

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Análise dinâmica de um quadro de bicicleta

Dissertação do MIEM



FEUP

Pedro Manuel Teixeira Ribeiro

030504101

Orientador na FEUP: Prof. Mário Vaz

Julho de 2013

Resumo:

Este trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento estrutural, estático e dinâmico, do quadro de uma bicicleta de montanha.

Primeiro é apresentada uma pequena revisão bibliográfica sobre a evolução da bicicleta desde o seu aparecimento até aos dias de hoje. São mostrados resultados de uma pesquisa sobre os materiais mais utilizados, as suas propriedades mecânicas e características que influenciam a sua aplicação, bem como as técnicas de fabrico dos quadros nesses materiais. Além disso, e com base no estudo da literatura é dada uma noção sobre o conforto e sua quantificação, além de outras características da bicicleta que influenciam o seu desempenho.

Concluída esta parte inicial é apresentado um modelo numérico representativo do quadro e os resultados obtidos de algumas simulações efetuadas utilizando o modelo numérico desenvolvido. Estas simulações foram realizadas por forma a perceber quais os pontos ou zonas do quadro com maior tensão. De referir que o modelo matemático foi previamente aferido através de ensaios experimentais recorrendo a extensometria elétrica. Depois foram determinados os modos de vibração através da análise modal experimental. E por fim procura-se desenvolver uma metodologia que permita entender qual a influência da suspensão traseira no comportamento dinâmico do quadro, utilizando para isso ensaios experimentais no terreno em duas situações diferentes, um *sprint* em subida e um salto.

Após a realização do estudo verificou-se que a escora traseira é o elemento da estrutura que sofre maiores solicitações tanto ao nível de vibração como de tensão mecânica. A suspensão traseira é também um elemento com grande influência no comportamento dinâmico do quadro pelo que justifica um estudo mais aprofundado a realizar futuramente.

Abstract

This paper presents a study on the structural, dynamic and static behavior of a frame of a mountain bike.

First is presented a brief review of the literature on the evolution of the bicycle from its appearance to the present day. Shown results of a survey on the most used materials, their mechanical properties and characteristics that influence their implementation, as well as the manufacturing techniques of the frames in these materials. Furthermore, based on the study of literature is given a sense of comfort and their quantification as well as other features of the bicycle that affect its performance.

Once this initial part is presented a numerical model representative of the framework and the results of some simulations performed using the numerical model. These simulations were carried out in order to understand which points or areas of the frame with higher stress. Note that the mathematical model was previously calibrated through experimental tests using electrical strain gages. After, were determined by experimental modal analysis the vibrational modes of the frame. Finally we seek to develop a methodology to understand the influence of the rear suspension on the dynamic behavior of the frame, using this experimental field in two different situations, one uphill sprint and a jump.

After the completion of the study it was found that the rear outrigger structure element is greater suffering requests at both vibration and mechanical stress. The rear suspension is also a factor with great influence on the dynamic behavior of the framework that justifies further study to conduct future.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar e de forma especial aos meus Pais e irmãs por todo o apoio que demonstraram não só ao longo da realização deste trabalho como ao longo de toda a minha vida. Foram um suporte indispensável para a elaboração deste trabalho pelo que apresento aqui toda a minha gratidão.

A toda a minha família e amigos, não só pelo apoio, mas também pelos excelentes momentos passados.

Ao meu orientador, Eng.º Mário Vaz pela sua disponibilidade, dedicação e por todos os esforços feitos para que fosse possível a realização desta dissertação.

E por fim, ao Eng.º Nuno Viriato e Eng.º Hernâni Lopes pela disponibilidade demonstrada ao longo da realização dos ensaios experimentais.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Objetivos e motivação	1
1.2. Estado da arte	4
1.2.1. Evolução da bicicleta	4
1.2.2. A bicicleta de montanha	7
1.2.3. Quadro de bicicleta.....	10
2. Materiais	13
2.1. Aço.....	13
2.1.1. Aço ao Carbono – AISI 1040.....	15
2.1.2. Chromoly (CrMo) – AISI 4130	15
2.1.3. Aço Reynolds	15
2.2. Alumínio	16
2.2.1. Liga de Alumínio – AISI 6061.....	17
2.2.2. Liga de Alumínio – AISI 7005.....	17
2.3. Titânio.....	18
2.4. Fibra de Carbono	19
2.4.1. Como é feito o quadro?	20
3. Vibração e conforto	23
3.1. O quadro como um sistema de absorção de choque.....	23
3.2. Vibração do corpo	27
3.2.1. Vibração de corpo inteiro – Norma ISO 2631	28
3.2.2. Vibração transmitida á mão– Norma ISO 5349-1	29
3.3. Análise modal experimental	31
4. Simulação Numérica	33
4.1. Extensometria.....	33
4.2. Modelação do quadro	37

4.3.	Validação do modelo numérico	39
4.3.1.	Simulação numérica.....	39
4.3.2.	Colocação dos extensómetros	41
4.3.3.	Análise estática da deformação do quadro	43
5.	Comportamento dinâmico do quadro	47
5.1.	Sistema de n graus de liberdade em regime forçado	47
5.2.	Análise modal experimental	49
5.2.1.	Simulação numérica.....	50
5.2.2.	Ensaio experimental	52
5.3.	Análise dinâmica da deformação do quadro	59
5.3.1.	Testes experimentais	59
6.	Conclusão	72
7.	Bibliografia	74

Índice de figuras

Figura 1 - Draisienne, primeira bicicleta [1].	4
Figura 2 - Bicicleta de Michaux [1].	5
Figura 3 - Bicicleta “Segura” [1].	6
Figura 4 - Schwinn Excelsior [2].	7
Figura 5 - Entusiastas do btt com as suas “Cruisers” [2].	8
Figura 6 - Exemplo de “Butting”. [17].	14
Figura 7 - Exemplos de construção tubo-a-tubo.	20
Figura 8 - Fibra de carbono recortada [22].	21
Figura 9 - Placa de fibra de carbono a ser colada [22].	21
Figura 10 - Molde pronto para o forno [22].	22
Figura 11 - Monocoque Vs. Tubo-a-tubo [22].	22
Figura 12 - Sistema vibratório.	24
Figura 13 - Sistema vibratório – Transmissão passiva [23].	25
Figura 14 – Transmissibilidade em função da frequência [23].	26
Figura 15 - Transmissibilidade: situação real.	27
Figura 16 - Eixo de medição para o corpo humano [24].	28
Figura 17 - Direções de medição da vibração transmitida á mão [25].	30
Figura 18 - Limites de exposição de vibração na mão [25].	30
Figura 19 - Análise modal em placa [26].	31
Figura 20 - Resposta de um acelerómetro [26].	31
Figura 21 - Resposta no tempo (azul) e Função de resposta em frequência (vermelho) [26].	32
Figura 22 - Deformações padrão para uma placa simples [26].	32
Figura 23 - Definição de deformação elástica [27].	33
Figura 24 – Grelha de um Extensómetro de folha.	34
Figura 25 - Ponte de Wheatstone [27].	35
Figura 26 - Curva tensão-deformação.	37
Figura 27 - Modelo utilizado - Scott Spark 20 [28].	37
Figura 28 - Geometria do quadro [28].	38
Figura 29 - Quadro - Modelo numérico em CAD.	39
Figura 30 - Condições de fronteira – primeiro ensaio.	40
Figura 31 - Deformação do quadro – primeiro ensaio.	41

Figura 32 - Locais para colocação dos extensómetros	42
Figura 33 - Superfície pronta para colagem do extensómetro.....	42
Figura 34 - Verificação da estabilidade do sinal	43
Figura 35 - Sistema pronto para a medição	44
Figura 36 - Resultados ensaio experimental	44
Figura 37 - Gráfico de tensão, modelo experimental.....	45
Figura 38 - Resultados simulação numérica.....	45
Figura 39 - Diagrama de corpo livre - Sistema com n graus de liberdade [23].....	47
Figura 40 - 1º modo de vibração - Flexão	50
Figura 41 - 2º modo de vibração - Flexão	51
Figura 42 - 3º modo de vibração - Torção.....	51
Figura 43 - Pontos de colocação do acelerómetro.....	52
Figura 44 - Configuração do teste – Condições de fronteira livre	52
Figura 45 - Acelerómetro colocado no quadro	53
Figura 46 - Martelo de impacto Brüel & Kjaer, modelo 8200	53
Figura 47 - Função de resposta em frequência - Ponto 1	54
Figura 48 - Função de resposta em frequência – Ponto 2.....	54
Figura 49 - Função de resposta em frequência - Ponto 3	55
Figura 50 - Função de resposta em frequência - Ponto 4	55
Figura 51 - Função de resposta em frequência - Ponto 5	56
Figura 52 - Função de resposta em frequência - Ponto 6	56
Figura 53 - Função de resposta em frequência - Ponto 7	57
Figura 54 - Função de resposta em frequência - Ponto 8	57
Figura 55 - Localização dos extensómetros e respectiva cor	59
Figura 56 - Gráfico de deformações relativas ao 1º ensaio – Suspensão desbloqueada.	60
Figura 57 - Gráfico de deformações relativas ao 2º ensaio – Suspensão Bloqueada.	60
Figura 58 - Gráfico de deformação relativas ás 3 primeiras pedaladas – Suspensão bloqueada	61
Figura 59 - Gráfico de deformação relativas ás 3 primeiras pedaladas – Suspensão desbloqueada.....	61
Figura 60 - Força transmitida pela pedalada á escora traseira	62
Figura 61 - Força aplicada numa rotação dos pedais [14].....	64
Figura 62 - Deformação durante a segunda pedalada – suspensão bloqueada.....	64
Figura 63 - Deformação durante a segunda pedalada – suspensão desbloqueada	64

Figura 64 - Gráfico de deformações relativas ao ensaio 3 – Salto com suspensão bloqueada	65
Figura 65 - Gráfico de deformações relativas ao ensaio 4 – Salto com suspensão desbloqueada.....	65
Figura 66 - Forças transmitidas durante o salto.....	66
Figura 67 - Gráfico de deformações relativas ao salto – Suspensão bloqueada	67
Figura 68 - Gráfico de deformações relativas ao salto – Suspensão desbloqueada	67
Figura 69 - Momento em que a roda traseira aterra do salto.....	68
Figura 70 - Momento em que o peso do ciclista é transferido para a bicicleta	68
Figura 71 - Relação força vs. Deslocamento da suspensão.	70
Figura 72 - Rigidez da suspensão ao longo do curso	70
Figura 73 - Curvas de deformação para o salto com suspensão- 1ºmomento.....	71

Índice de tabelas

Tabela 1 - Valores de deformação - Modelo experimental e numérico.....	46
Tabela 2 - Frequências naturais calculadas no Ansys	50
Tabela 3 - Frequências naturais nos diferentes pontos	58
Tabela 4 - Frequências naturais calculadas e medidas	58
Tabela 5 - Valores máximos de deformação para as 3 primeiras pedaladas.	62
Tabela 6 - Valores máximos de deformação para os saltos.	69
Tabela 7 - Diferença de deformação entre as duas situações	69

1. Introdução

1.1. Objetivos e motivação

A realização desta tese surge no âmbito do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no caso particular da opção de Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel.

A seleção do contexto desta tese prende-se com o gosto pessoal do autor por bicicletas e a vontade de aprofundar conhecimentos nesta área, juntamente com o querer utilizar numa situação concreta os conhecimentos anteriormente adquiridos.

A bicicleta é, nos dias que correm, um dos meios de transporte mais utilizados, tanto em atividades de lazer como o cicloturismo como em modalidades de alta competição (ciclismo de estrada, btt, entre outras) ou ainda como meio de transporte quotidiano. Devido à subida de preço dos combustíveis, à crescente preocupação com os níveis de poluição que a atmosfera do planeta está a atingir e ao facto de vários estudos indicarem a necessidade de realizar uma atividade física regular, faz com que o uso da bicicleta esteja em crescimento.

A utilização da bicicleta e, principalmente, a nível profissional, vai de mãos dadas com a melhoria da tecnologia, no sentido de aumentar a eficiência da sua utilização. A título de exemplo refira-se a utilização da bicicleta na competição de contra-relógio onde a posição do ciclista assume particular importância. Por esta razão são realizados estudos no sentido de diminuir o peso da estrutura e conseguir uma posição de condução em que a resistência do ar possa ser reduzida. Já foram realizados testes em túneis de vento para procurar a melhor posição na bicicleta e realizadas diversas adaptações no quadro e restantes elementos para conseguir os propósitos referidos. Este é apenas um aspeto do desenvolvimento deste veículo, mas pode ainda destacar-se muitos outros, tais como: o desenvolvimento de melhores engrenagens, travões mais eficientes, pneus com menor resistência ao rolamento e maior atrito, rodas mais eficientes, etc .. Todos estes aspetos ajudam os ciclistas de competição a alcançar melhores resultados e os utilizadores regulares a dispor de melhores veículos e mais adaptados à utilização que deles se faz.

No entanto, deve referir-se que o principal componente duma bicicleta é o quadro. Esta estrutura é responsável por suportar as cargas resultantes da utilização do veículo, quer através do selim e guiador, quer através dos pedais e das rodas. Mesmo que todos os outros componentes da bicicleta sejam de qualidade superior, o máximo desempenho nunca será alcançado sem um quadro bem desenhado e de qualidade.

Qualquer ciclista quer que a sua bicicleta seja leve, rígida, resistente, com boa aparência, confortável e poder comprá-la por um preço razoável.

O engenheiro que desenvolve uma bicicleta enfrenta um grande desafio, pois não é fácil conceber uma estrutura que atenda a todos estes requisitos, alguns antagônicos, e conseguir produzi-la depois a um preço compatível com o mercado. Por exemplo, rigidez e conforto são características difíceis de conciliar, um compromisso entre ambas deve ser encontrado recorrendo a um criterioso processo de seleção de materiais e à concepção de uma estrutura bem adaptada à utilização desejada para a bicicleta. Dependendo do material utilizado para o quadro, um ou outro aspeto pode ser cumprido de melhor forma sem comprometer as outras características. Por tudo isto o projeto de uma bicicleta, ainda que aparentemente pareça uma tarefa simples pode revelar-se um desafio importante, dependendo da exigência e dos objetivos definidos previamente para o projeto.

Tendo em conta as condicionantes de projeto, os principais parâmetros que influenciam o desempenho da bicicleta e a experiência do autor na condução deste veículo, foram definidos os seguintes objetivos para esta dissertação de mestrado: primeiro avaliar as deformações geradas no quadro pela utilização normal da bicicleta, isto é, identificar os pontos críticos e criar e aferir um modelo numérico para auxiliar nesta tarefa, segundo estudar o comportamento dinâmico do quadro da bicicleta, isto é, conhecer a sua resposta dinâmica a cargas variáveis. Este estudo é de grande importância, pois contribui fortemente para a otimização de um quadro de bicicleta.

O estudo do comportamento dinâmico do quadro permite conhecer a sua reação quando submetido a solicitações de vibração provenientes das irregularidades da superfície. O comportamento da estrutura é de grande importância para o conforto do ciclista, mas também para o controlo deste sobre a bicicleta. Quanto mais atenuadas forem as vibrações provenientes das irregularidades da superfície, melhor o ciclista se irá sentir em cima da bicicleta e mais facilmente realizará o seu controlo. As vibrações que não são absorvidas pela bicicleta serão absorvidas pelo corpo do ciclista e isso faz com que ocorra mais fadiga muscular e, assim, piore o desempenho do ciclista.

Resumindo os objetivos desta dissertação, poderá indicar-se como principais os seguintes:

- Estudar e conhecer o quadro de uma bicicleta de montanha;
- Criar um modelo numérico que permita simular o comportamento do quadro da bicicleta;
- Efetuar uma análise estática e dinâmica das deformações no quadro utilizando extensometria;
- Determinar por via numérica os modos de vibração do quadro;
- Efetuar uma análise dinâmica do quadro utilizando técnicas de análise modal experimental;
- Finalmente, avaliar a influência da suspensão traseira no funcionamento do quadro;

1.2. Estado da arte

1.2.1. Evolução da bicicleta

O veículo que é atualmente considerado o antepassado da bicicleta, tal como a conhecemos hoje, foi inventado por um barão, alemão de Karlsruhe, Karl Friedrich Drais von Sauerbronn [1]. Enquanto Drais foi responsável por invenções como o moedor de carne, o sistema binário e uma máquina de escrever, a Draisienne, como ficou conhecido o veículo inventado, era a sua reivindicação à fama. Este dispositivo rudimentar foi mostrado pela primeira vez ao público em 1817 e tinha sido projetado como uma máquina de andar (Laufmaschine). O utilizador equilibrava-se no assento colocado entre as duas rodas e utilizava as suas pernas para por a bicicleta em movimento. Na figura 1 reproduz-se uma fotografia deste veículo.



Figura 1 - Draisienes, primeira bicicleta [1].

As Draisienes e outras máquinas semelhantes que foram surgindo com o tempo, não convenceram a comunidade científica que poderiam ser um modo eficiente de transporte de tração humana.

O grande passo no desenvolvimento da bicicleta foi o aparecimento de uma solução mecânica mais eficiente para transformar a força gerada pelo movimento humano e convertê-la em movimento do veículo. Este grande salto na evolução surgiu com a introdução do pedal e manivelas.

O primeiro pedal surgiu em 1855 e foi inventado pelo francês Pierre Michaux (1813 - 83) [1], que o instalou num veículo com duas rodas traseiras e uma dianteira. Os pedais eram ligados à roda dianteira e a invenção ficou conhecida como "Velocípede".

Em 1861 o mesmo Pierre Michaux construiu outra bicicleta com pedais, mas agora adaptados diretamente à roda da frente. Os pedais foram diretamente ligados ao eixo da roda da frente por uma manivela, tal como se mostra na figura 2.



Figura 2 - Bicicleta de Michaux [1].

Para se obter maior distância numa só pedalada foram projetadas e construídas rodas com um diâmetro maior o que acabou por conduzir à bicicleta com roda grande. Para diminuir o peso e o possível colapso da roda em situações de impacto, James Starley (1831 - 1881) introduziu a roda de raios, solução que é ainda hoje usada na maioria das bicicletas atuais [1].

Tinha sido reconhecido que á bicicleta de roda grande faltavam características que a tornassem segura para todos a poderem utilizar. Para montar numa bicicleta destas dimensões era necessária agilidade e as quedas eram comuns. Experimentaram-se diferentes guiadores, mas foi a introdução da corrente e da direção direta que tornou a bicicleta mais segura. A inclusão desses avanços tecnológicos ocorreu na década de 1880, e é altamente provável que essas invenções tenham sido feitas simultaneamente por diferentes fabricantes de bicicletas [1].

A bicicleta "Segura", tal como o nome indica, era concebida com a preocupação de proporcionar ao utilizador maior segurança e conforto. Recursos como um assento suspenso com flexibilidade foram incluídos, o que pode ser considerado como a primeira característica

de uma bicicleta, em que surgia um dispositivo parecido com a suspensão. Esta solução de projeto é ilustrada na figura 3.



Figura 3 - Bicicleta “Segura” [1].

A segunda grande revolução surgiu com a introdução feita por John Boyd Dunlop, um veterinário de Belfast, que desenvolveu o primeiro pneu para o triciclo do seu filho em 1887 [1]. Este dispositivo consistia na colocação de um rolo de lona e borracha cheio de ar a envolver o perímetro da roda. No entanto, esta invenção tinha o inconveniente de exigir uma cuidada manutenção. A indústria de bicicletas ficou um pouco receosa em seguir os passos propostos pelo recém-criado Dunlop Pneumatic Tire Company, mas rapidamente aceitou o pneu, em parte devido ao sucesso de W. Hume. Este atleta foi o primeiro a competir numa bicicleta equipada com pneus, ganhando quatro de quatro corridas realizadas em Belfast, o que foi suficiente para convencer o público e a indústria das vantagens do pneu [1].

Em 1891 os franceses Edouard e André Michelin lançam o pneu desmontável. Em resposta aos avanços de Dunlop, os irmãos Michelin inventaram um pneu de manutenção mais fácil, que enchia através de uma válvula e ainda permitia a sua remoção e substituição em caso de dano. Em quatro anos o pneu tornou-se norma em todas as bicicletas, proporcionando maior conforto para o utilizador e contribuindo para o aumento da velocidade, sem comprometer a sua segurança de utilização.

Desde o final de 1880 até à década de 1970, muitas invenções permitiram à bicicleta tornar-se um modo mais seguro e conveniente de transporte. O desejo humano de competição com estes veículos também foi cumprido com a criação de corridas que encorajaram inventores para melhorar a velocidade e a eficácia da pedalada. A roda livre foi criada para oferecer maior conforto ao ciclista. Este sistema permitia interromper a pedalada especialmente, em descidas, em trajetos com vento a favor e em alguns momentos de calma na competição.

1.2.2. A bicicleta de montanha

No início da década de 1970, uma nova modalidade desportiva surgiu nas montanhas da Califórnia. O *“mountain bike”*, denominado em Portugal de BTT, apareceu com novas soluções de projeto, visto que as bicicletas de estrada, criadas até á data, não eram adequadas para superar obstáculos da natureza suportando os esforços gerados nas descidas íngremes e pedregosas percorridas a elevadas velocidades.

Este tipo de bicicleta (Bicicleta de Todo o Terreno), surgiu pela necessidade de criar máquinas mais robustas que permitissem superar obstáculos mais difíceis. Os entusiastas por esta modalidade foram atraídos pela emoção de andar pelos corta-fogos ou trilhos *“single-track”*.

Tudo começou ao redor do Monte Tamalpais em Mann County, Califórnia. As bicicletas usadas então eram *“Cruisers”* com pneus balão e apenas com uma velocidade. Gary Fisher foi o primeiro a experimentar equipamentos e estruturas para fazer a sua máquina mais adequada para os trilhos irregulares da montanha. Usou um quadro Schwinn Excelsior (figura 4) que proporcionava uma melhor pedalada e possuía uns travões de tambor com manetes obtidas a partir de uma motocicleta.



Figura 4 - Schwinn Excelsior [2]

Logo depois foram incorporados desviadores para que os pilotos pudessem andar até á montanha, em vez de apanharem boleia para o topo na parte de trás de alguma carrinha ou trator.

Em 1979, Gary Fisher e Charlie Kelly fundaram uma empresa chamada *“MountainBikes”* que se tornaria o nome genérico deste tipo de bicicleta. Foram feitas

alterações para os modelos atualmente classificados como *mountain bike* original, incluindo engrenagens, garfos de suspensão (uma ideia retirada do design das motorizadas). [2]



Figura 5 - Entusiastas do btt com as suas “Cruisers” [2]

O rápido desenvolvimento do *mountain bike* teve o seu culminar na sua classificação como um desporto olímpico, em 1996, fazendo com que uma série de inovações em *design* de bicicletas aparecessem no mercado. No início dos anos 90 os primeiros estudos acerca de sistemas de suspensão surgiram em publicações relacionadas com estes assuntos.

Inicialmente modeladas com inspiração em garfos de suspensão de motorizadas, uma grande variedade de sistemas de suspensão de bicicletas foi criada. Estes incluem atualmente o relativamente simples sistema de mola, amortecedores telescópicos ar-óleo, montados em sistemas com um ou vários pontos de rotação.

A questão principal para o potencial proprietário de uma suspensão era muitas vezes relacionada com o tipo de suspensão e sistema de amortecimento que devia ser escolhido.

Olsen [3] em 1993 resumiu as diferenças entre os sistemas de amortecimento e explicou como a dissipação de energia é controlada. Em particular, foi sugerido que o amortecimento hidráulico seria o tipo mais comum utilizado nos garfos da suspensão dianteira devido á diminuição do atrito.

Além disso, a conceção das ligações possuindo juntas de articulação em vez de articulações de deslizamento, foram identificadas como uma excelente opção, pois a roda iria viajar num arco ao invés de uma linha reta.

Orendurff et al. [4] em 1996 estudaram os efeitos provocados pela alteração da rigidez da suspensão. Compararam três ajustes diferentes de rigidez da suspensão, através da análise da vibração da bicicleta, recorrendo a acelerómetros colocados no quadro e na forqueta.

O ensaio consistiu em efetuar um salto com a bicicleta com os três ajustes de rigidez diferentes e concluíram que o ajuste intermédio da rigidez era o que obtinha melhores resultados, registando o melhor amortecimento do impacto.

Seifert et al. [5] em 1997 descreveram a vantagem fisiológica da utilização de bicicletas de suspensão, mostrando um decréscimo no trauma muscular num percurso plano, mas não avaliaram as diferenças em terreno acidentado.

Compararam também os efeitos de vários sistemas de suspensão (rígida, ar / óleo amortecida, e suspensão total) sobre o gasto de energia, esforço físico e desempenho numa prova de BTT. Embora não tenham sido encontradas diferenças entre os garfos para os dados metabólicos em piso plano ($\dot{V}O_2$ absoluta e relativa, média e frequência cardíaca máxima), na prova de BTT o rendimento foi significativamente melhorado quando se utilizou um sistema de suspensão dianteira em vez de um sistema de suspensão rígida ou total.

Especularam então que estas diferenças podiam ser devido à absorção de choques, com uma perda mínima de energia, em comparação com as condições rígidas e totalmente suspensas.

Um estudo de Gillespie et al. [6] em 1998 examinou o deslocamento vertical máximo do cubo da bicicleta ao passar ao longo de uma série de saliências com diferentes tipos de suspensão. Eles encontraram uma significativa redução de velocidade durante os impactos da bicicleta numa série de irregularidades, mas não distinguiram as diferenças de desempenho para os vários tipos de sistemas de suspensão.

Com apenas quatro pessoas envolvidas neste estudo, o estudo estatístico foi uma ferramenta importante para a apresentação de resultados.

Em 2000 Mcrae et al. [7] efetuaram um estudo para avaliar os efeitos da bicicleta de suspensão dianteira (HT) e de suspensão total (FS) no desempenho do ciclista durante uma subida contra-relógio numa estrada pavimentada e num percurso fora de estrada.

Seis ciclistas treinados ($35,6 \pm 9$ anos, $76,9 \pm 8,8$ kg, $\dot{V}O_2$ pico $58,4 \pm 5,6$ ml/kg/min) foram cronometrados usando ambos os sistemas de suspensão num percurso pavimentado em subida (1.62 km, ganho de elevação de 183 m) e um percurso fora de estrada também em subida (1.38 km, 123 m ganho de elevação). Durante os testes de campo, o $\dot{V}O_2$

foi monitorizado continuamente com um analisador de gases portátil KB1-C e a potência de pedalada com um sistema de treino SRM [29].

Concluiu-se que, apesar das diferenças significativas na potência necessária entre a bicicleta de suspensão dianteira e a bicicleta de suspensão total durante o percurso, essas diferenças não se traduzem em diferenças significativas no gasto de oxigênio ou no tempo para concluir o percurso.

1.2.3. Quadro de bicicleta

D. Arola et al. [8] em 1999 publicaram um artigo sobre o *design* dos novos quadros de bicicleta. Concluíram que geralmente o *design* dos quadros são motivados pelo peso, rigidez e conforto do utilizador sendo habitual incorporar materiais de engenharia de ponta. Na verdade o ciclismo competitivo tem promovido a utilização de vários materiais estruturais avançados, incluindo ligas não-ferrosas (principalmente alumínio e titânio), polímeros reforçados com fibras e materiais compósitos avançados tais como o carbono com resinas de epóxico. Tanto o *design* do quadro como os materiais utilizados contribuem para o peso final do conjunto e assim para o consumo de energia do ciclista. A energia é maioritariamente empregue na propulsão e uma pequena parte na deformação elástica da estrutura. Portanto, a minimização da massa total da estrutura e o aumento da rigidez à flexão do quadro são essenciais.

C. Calfee e David Kelly [9] em 2002 concluíram que o quadro de bicicleta ideal para um determinado ciclista teria que se ajustar às suas dimensões antropométricas e ser o mais leve possível. Deveria ter resistência mecânica para absorver as tensões resultantes dos choques provocados pelas irregularidades do terreno e o quadro permitir entregar a força aplicada nos pedais à corrente e, conseqüentemente, à roda traseira, isto é, sem perdas de energia apreciáveis. Ser durável, suportar a carga continua da pedalada e ser suficientemente forte para resistir a impactos inesperados e forças de torção e flexão. Possuir acabamentos atraentes, resistir á corrosão e ter um preço compatível com o poder de compra do público alvo. Concluíram ainda que os quadros de bicicleta de aço, titânio e fibra de carbono têm melhor resistência à fadiga que o alumínio.

H. Nielens et al. [10] em 2004 fizeram um estudo sobre sistemas de suspensão de bicicleta de montanha.

A literatura sugeria que a energia que é dissipada pelas suspensões é mínima e, provavelmente negligenciável na maioria dos terrenos. No entanto, os poucos estudos sobre o tema, bem como as limitações das conclusões que podiam ser extraídas da maioria deles indicaram que se devia aprofundar os estudos sobre este tema antes de apoiar a utilização da bicicleta de suspensão total em todos os tipos de percurso e para todos os ciclistas. Deve referir-se que a inclusão de suspensões implica normalmente a utilização de sistemas mecânicos que são penalizadores em termos de peso e preço finais.

H. Nielens et al. centraram-se então na realização de simulações mecânicas e concluíram que as bicicletas de suspensão dianteira seriam melhores para provas de *cross-country*, provas de curta duração em que é aplicada a máxima potência do ciclista durante um curto espaço de tempo, pois a energia dissipada seria menor comparativamente à bicicleta de suspensão total.

Finalmente, consideraram as bicicletas de suspensão total mais confortáveis, podendo reduzir significativamente o esforço físico, especialmente em eventos de longa duração e para a utilização em lazer.

J. Dingwell et al. [11] em 2008, estudaram a fadiga muscular em ciclistas de alta competição que levam o seu esforço até à exaustão. Realizaram este estudo para verificar qual a influência da fadiga muscular em lesões por esforços repetidos.

D. Savionek [12] em 2010 desenvolveu um trabalho sobre a medição e avaliação da exposição humana à vibração transmitida ao sistema mão-braço durante a prática de ciclismo. Este foi um estudo experimental onde foram analisados diferentes tipos de pavimento e também distintos modelos de bicicletas.

F. Onaya [13] em 2011, estudou as geometrias e critérios de projecto relativos ao conforto do ciclista através da elaboração de modelos do conjunto ciclista/bicicleta e sua posterior simulação para obter a resposta dinâmica no tempo, concluindo sobre a influência das diversas variáveis no comportamento dinâmico do conjunto.

F. Mortier [14] em 2011, analisou o comportamento dinâmico de bicicletas de competição em estrada, para determinar os efeitos da aplicação da fibra de carbono como material de construção do quadro. O conforto do ciclista foi um dos pontos a que se deu mais importância, através de medições de força e aceleração nos pontos de contacto entre o

utilizador e a bicicleta. A força distribuída pelo selim, guiador e pedais foi também examinada assim como a potência entregue pelo ciclista.

Chia-Chin Wu [15] em 2012, estudou a eficiência da pedalada, determinando o ângulo dos *cranks* para o qual se deve aplicar a força nos pedais. Comparou ainda cinco sistemas de suspensão através do estudo da força de pedalada em diferentes terrenos, velocidade de passagem, forças de contacto da roda da frente e de trás, compressão na suspensão e velocidade vertical do selim e guiador, por forma a concluir qual o melhor sistema de suspensão para cada tipo de terreno.

2. Materiais

Uma das áreas mais ativas de inovação, especialmente na última década, é a seleção do material de que o quadro é construído. Existem atualmente vários materiais utilizados na construção dos quadros, entre eles incluem-se, aço, alumínio, titânio, magnésio, fibra de carbono, polímeros e até madeira ou bambu. Actualmente os fabricantes de quadros de bicicletas utilizam essencialmente quatro materiais: aço, alumínio, titânio e compósitos com fibra de carbono. Serão estes os materiais em que melhor se reúnem as propriedades necessárias a criar um quadro leve, rígido e resistente.

2.1. Aço

O aço é a escolha tradicional para quadros de bicicleta e continua a ser muito popular entre os fabricantes. O quadro em aço é resistente, durável, relativamente barato e fácil de construir e de reparar. Em caso de rotura pode ser soldado, assim como é fácil de reparar no caso de danos por moessa ou entalhe. Contudo, o aço oxida facilmente quando exposto à água, sol e especialmente ao sal da estrada, nestes casos necessita de tratamentos superficiais de proteção.

Ao contrário do alumínio, o aço é, teoricamente, imune ao colapso provocado por fadiga. Alguns aços possuem tensão limite de fadiga que, não sendo ultrapassada, permite vida infinita para os componentes. Enquanto não é carregado para além do seu limite de fadiga, um tubo de aço não irá desenvolver fissuras que possam conduzir a falha estrutural por fadiga. No entanto, apesar de raro, não é impossível uma estrutura de aço partir devido a pequenos defeitos nos próprios tubos ou devido a pontos fracos na soldadura.

Dadas as propriedades mecânicas de ambos os materiais, as estruturas de aço são normalmente mais flexíveis em comparação com estruturas de alumínio. Dependendo da geometria geral do quadro, as construções em aço podem flectir ligeiramente sob carga. Esta flexibilidade pode amortecer alguns choques e proporcionar uma viagem mais confortável ao utilizador, contudo também contribui para absorver parte da energia que o utilizador gera ao pedalar.

A densidade do aço é superior à maioria dos materiais aplicados em quadros logo é mais pesado em volume. Porém, isto não significa que os quadros de aço sejam, necessariamente, mais pesados do que os quadros feitos noutros materiais. Os fabricantes muitas vezes utilizam técnicas de projeto e construção para reduzir o peso da estrutura sem

comprometer a resistência do quadro, tirando partido das propriedades mecânicas dos materiais.

Uma dessas técnicas de projeto consiste na utilização de tubos com as paredes de espessura variável. Devido à resistência inerente do aço, os tubos fabricados neste material podem, em teoria, ser construídos com paredes extremamente finas - 0,3 mm ou menos. Infelizmente estes componentes são de difícil utilização para os construtores, pois não há material suficiente para formar soldaduras seguras nas ligações entre tubos.

Como solução de compromisso, os construtores de quadros de aço usam geralmente, uma técnica conhecida como “*Butting*” no fabrico dos tubos. Nesta técnica as extremidades do tubo são mais espessas que o resto do tubo, aumentando a resistência onde é necessário e reduzindo a quantidade de material (e consequentemente o peso) ao longo da maioria do seu comprimento. A figura 6 apresenta exemplos de “*Butting*”, técnica que permite no fabrico de um quadro de aço poder reduzir o seu peso em mais de 15%. [16]

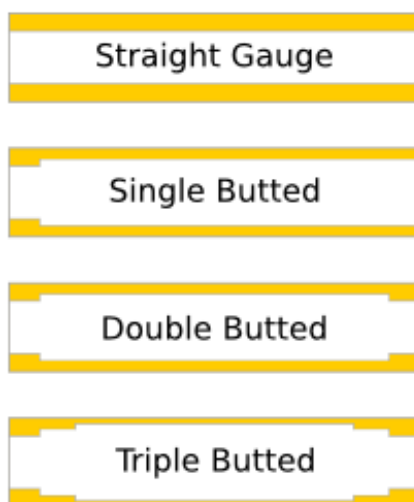


Figura 6 - Exemplo de “*Butting*”. [17]

Porém, nem todos os quadros de aço são iguais. Pode haver diferenças significativas entre os quadros de aço de alta e de baixa qualidade, tanto nas propriedades específicas da liga usada como na qualidade de construção da própria estrutura. As três principais ligas de aço utilizadas em quadros de bicicletas são: liga de aço ao carbono, Chromoly (CrMo), e as ligas de aço Reynolds. [18]

2.1.1. Aço ao Carbono – AISI 1040

O aço de alta resistência à tração ou ao carbono é uma liga comum e barata, composta de ferro misturado com 0,2% a 2,0% de carbono. (De notar que quando o ferro é misturado com mais de 2,1% de carbono passa a ser designado por "ferro fundido").

O aço ao carbono é uma liga relativamente fraca. Embora tenha essencialmente a mesma densidade que outros aços, os fabricantes que o utilizam são forçados a recorrer a tubos de paredes grossas para garantir resistência suficiente, raramente usando a técnica “*Butting*”. Por esta razão, os quadros de aço ao carbono são muito mais pesados do que os seus homólogos de Chromoly.

Hoje em dia os quadros de aço ao carbono são empregues principalmente para bicicletas de criança e por vezes são encontrados em bicicletas de baixo custo para adultos.

2.1.2. Chromoly (CrMo) – AISI 4130

O Chromoly é já um aço ligado, com cerca de 0,5 a 1% de Cromio e 0,2 a 0,3% de Molibdénio. O aço designado segundo a norma AISI, 4130 é apenas um de uma família de ligas de aço 4000, mas é o único utilizado para quadros de bicicletas.

O Crómio é o elemento de liga que faz com que o aço seja inoxidável, mas o nível de Crómio da liga de aço 4130 não é suficientemente elevado para proporcionar resistência à corrosão (Aço inoxidável tem 10% a 11% de crómio).

Um quadro em Chromoly adequadamente construído é apenas ligeiramente mais pesado do que um de alumínio, e muito mais resistente e durável.

2.1.3. Aço Reynolds

O aço Reynolds foi criado em 1953, pela empresa de bicicletas Reynolds, daí o seu nome. Esta empresa começou por fabricar um tubo de aço ligado com manganês e molibdénio a que chamou Reynolds 531. Esta liga era bastante resistente e relativamente leve sendo muito utilizada em bicicletas de corrida, bem como na construção de aviões na indústria britânica.

Ao longo dos anos, Reynolds atribuiu um número a cada tipo de tubo que criava, que indica a liga e o tratamento térmico específico, mas também a espessura da parede e o “*Butting*” dos tubos.

Esta série de tubos inclui o Reynolds 453 (um tubo com uma única dupla espessura feita de uma liga de manganês-titânio), Reynolds, 501, 520, 525 e 725 (usando tubos de aço 4130), Reynolds 753 (tubos de alta qualidade em liga de manganês e molibdênio, essencialmente um tubo melhor que o Reynolds 531), Reynolds 853 (aço 4130 com rigidez superior devido ao tratamento térmico) e Reynolds 953 (um aço á prova de “ferrugem” introduzido em 2006), este é talvez o melhor aço disponível para bicicletas hoje em dia, criando quadros mais resistentes que os de titânio e mais leves que os de alumínio.

Embora o aço Reynolds seja hoje menos comum em quadros de bicicleta algumas dessas ligas ainda continuam em uso. [18]

2.2. Alumínio

Os quadros de bicicletas de alumínio têm a reputação de ser consideravelmente mais leves que os de aço. Em termos de volume, o alumínio é inerentemente mais leve e menos resistente e rígido do que o aço, contudo é atualmente quase tão barato como o aço e tem uma relação peso-resistência muito superior.

Porém, na prática, os quadros de alumínio são mais rígidos do que a maioria dos quadros de aço, em virtude do uso de tubos de grande diâmetro e espessura. Esta rigidez pode contribuir para melhorar a movimentação e aceleração quando *sprintar* ou subir, apesar de proporcionar uma resposta mais dura ou mais desconfortável do que um quadro de aço. [18]

Ao contrário dos quadros de aço, os quadros de alumínio são resistentes à corrosão, mas são mais susceptíveis a falhas por fadiga ao longo do tempo e mais propensos a ser danificados por impactos, principalmente os resultantes de quedas, existindo ainda o problema de serem mais difíceis de reparar.

A maioria dos quadros de alumínio são com tubos de perfil recto, embora se possa encontrar também a técnica de “*Butting*” aplicada neste material.

O alumínio é tipicamente ligado com outros elementos para melhorar as suas propriedades. Os elementos de liga constituem uma pequena fração do material, em percentagem geralmente inferior a 10%, mas que pode ter um impacto significativo na resistência mecânica e à corrosão, soldabilidade e preço do material. As ligas de alumínio comuns em quadros de bicicleta são: liga de alumínio 6061 e 7005. [18]

2.2.1. Liga de Alumínio – AISI 6061

A liga 6061 é uma família de ligas de alumínio combinando alumínio com magnésio (cerca de 1,0%) e silício (cerca de 0,5%), por vezes misturados com uma variedade de outros materiais, incluindo ferro, cobre, cromo, zinco, manganês e titânio. A liga 6061 é uma liga com boa soldabilidade.

Todas as ligas de alumínio 6061 têm o mesmo peso (densidade) e rigidez, mas a resistência da liga varia ligeiramente com os elementos de liga específicos e o tratamento térmico utilizado para produzir o material.

Há três têmperas comuns da liga de alumínio 6061:

6061-O é uma liga de recozido e é a mais fraca das três têmperas. Sendo muito fraca para ser utilizada nos tubos do quadro da bicicleta.

6061-T4 é um tratamento térmico com envelhecimento natural que é cerca de duas vezes mais resistente que o 6061-O.

6061-T6 é um tratamento térmico, com envelhecimento artificial que é cerca de 2,5 vezes mais forte do que 6061-O. A liga de alumínio 6061-T6 é provavelmente a liga mais popular usada em quadros de bicicletas, e é também amplamente utilizada no fabrico de outros componentes, como desviadores, espigões de selim, guiadores e pedais.

2.2.2. Liga de Alumínio – AISI 7005

A liga de alumínio 7005 é uma família de ligas que combinam alumínio com zinco (cerca de 4,5%), por vezes misturada com uma variedade de outros materiais, incluindo silício, magnésio, ferro, cobre, cromo, manganês e titânio. A liga 7005 é 10% mais resistente, mas mais frágil do que a liga 6061. Não exige um tratamento térmico dispendioso para se tornar resistente o suficiente e se adoptar num quadro de bicicleta. No entanto, um quadro da liga 7005 não tratado termicamente requer mais material para fornecer a mesma resistência.

A liga 7005 ocupa uma posição de mercado particularmente curiosa, pois é uma liga pouco usada relativamente á 6061, aparecendo em quadros de alumínio de gama baixa quando a liga não é tratada ou em quadros de alta gama quando a liga é tratada.

2.3. Titânio

O titânio é dono de uma mística única neste tipo de aplicação. Material não-ferroso e com o seu apelo de metal "indestrutível", tornou-se um dos mais cobiçados materiais na indústria das bicicletas. Entretanto, a sua raridade, a complexidade do seu fabrico e extracção, e a grande dificuldade em ser manipulado (cortes, dobras, soldas) faz com que seja muito caro. Ultimamente, as reservas de titânio tornaram-se ainda menores, devido ao grande consumo de titânio na construção dos novos grandes aviões, como o Airbus A-380.

É um material com altíssima resistência mecânica o que permite o uso de tubos com paredes muito finas, possibilitando a construção de quadros muito leves.

O titânio é praticamente imune á corrosão, muito resistente ao atrito e com um grande índice elástico, modulo de Young baixo. É mais resistente e leve que o aço porém, mais confortável e pesado que o alumínio. Possui uma flexibilidade semelhante ao aço, o que significa que absorve alguma da vibração provocada por irregularidades da superfície antes de atingir o ciclista. [19]

Os quadros designados por, de titânio, costumam usar ligas de titânio e tubos que foram originalmente desenvolvidos para a indústria aeroespacial. A liga mais comumente usada em quadros de bicicleta é a Ti-3Al/2.5V, constituída por aproximadamente 94,5% de Titânio, 3% de Alumínio e 2,5% de Vanádio. A liga Ti-6Al/4V também é utilizada, mas é mais difícil de soldar e maquinar. Frequentemente, os tubos são de Ti-3Al/2.5V enquanto o *drop-out* e outras secções periféricas são feitas da liga Ti-6Al/4V. Os tubos do quadro são quase sempre unidos por soldagem TIG (*Tungsten Inert Gás*).

O titânio pode ser utilizado no fabrico de vários componentes para as bicicletas, tais como, parafusos, cassetes, pedaleiras, forquetas, espigões de selim, avanços, guiadores e até mesmo raios e correntes.

2.4. Fibra de Carbono

Fibra de carbono é um termo genérico que se refere a uma diversa gama de materiais sintéticos que, combinados entre si, permitem a criação de um material composto - o compósito. O compósito inclui diferentes polímeros, de carbono e de grafite que são mantidos numa matriz de resina epoxídica. São caracterizados por apresentarem uma combinação de baixo peso, resistência mecânica muito elevada e elevada rigidez (módulo de elasticidade).

As fibras de carbono são produzidas a partir de fibras do precursor PAN (poliacrilonitrilo) através de três etapas de processamento: (1) estabilização, (2) carbonação e (3) grafitização. Na etapa de estabilização, as fibras de PAN são primeiro esticadas para se conseguir o alinhamento das redes fibrilares no interior de cada fibra, segundo o eixo respectivo. Em seguida, são oxidadas ao ar a cerca de 200 a 220°C enquanto permanecem traccionadas.

A segunda etapa no fabrico das fibras de carbono de elevada resistência é a carbonação. Nesta etapa as fibras de PAN já estabilizadas são aquecidas até que se transformam em fibras de carbono por eliminação de O, H e N da fibra do precursor. O tratamento térmico para a carbonação é geralmente realizado numa atmosfera inerte, a uma temperatura de 1000 a 1500°C. Durante o processo formam-se, no interior de cada fibra, fibrilas ou fitas com a estrutura da grafite, as quais fazem aumentar bastante a resistência à tracção do material.

A terceira etapa, ou tratamento de grafitização, é usada no caso de se desejar aumentar o módulo de elasticidade, embora tal resulte numa diminuição da resistência á tracção. Durante este processo, realizado acima de 1800°C, intensifica-se a orientação preferencial das cristalites de grafite no interior de cada fibra. [20]

Estas propriedades fazem com que os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados por fibra de carbono sejam especialmente atractivos para os quadros das bicicletas.

A grande vantagem é justamente a sua diversificação, pois permitem o desenvolvimento de combinações específicas para cada parte do quadro de uma bicicleta. O quadro pode ser rígido, maleável, resistente à torção lateral, longitudinal ou radial, enfim, quem define é o projetista de acordo com a aplicação final. A simples mudança de orientação das suas fibras no processo de moldagem já modifica as suas características. É possível, assim, fazer um quadro extremamente rígido lateralmente, mas ainda confortável e com capacidade de absorção longitudinal.

2.4.1. Como é feito o quadro?

Praticamente toda a fibra de carbono utilizada no fabrico de bicicletas é fabricada na China e em Taiwan em várias fábricas de componentes de fibra de carbono. As fábricas empregam engenheiros de materiais que pesquisam e aplicam as ideias e soluções propostas pelas marcas de bicicletas.

Normalmente a fibra de carbono utilizada é fornecida em rolos de tecido pré-impregnado. O termo pré-impregnado significa neste caso que as fibras de carbono já foram saturadas com resina, criando o material denominado – compósito.

Dois dos métodos mais utilizados no fabrico dos quadros de bicicleta são: a construção tubo-a-tubo e a construção monocoque.

Construção Tubo a Tubo

Este método pode ser comparado á soldagem dos tubos juntos. Tubos e formas pré-moldadas são ligados uns aos outros usando o excesso de material com fibra de carbono e resina.

As articulações são mantidas no lugar usando mini-moldes especiais e o quadro é então cozido no forno, ou nalguns casos, os mini moldes têm os seus próprios elementos de aquecimento. As articulações estão, assim, termofixas e consegue-se uma excelente resistência, comparável à do resto da estrutura de fibra de carbono. Este método é adequado para a produção em massa de grandes volumes e tem um desempenho comparável ao da construção monocoque.

As molduras tubo-a-tubo são mais limitadas na sua forma e perfis do tubo porque algumas transições de perfil requerem o uso de material de enchimento para suavizar as articulações. Na figura 7 podem ver-se duas uniões realizadas por este processo. [21]

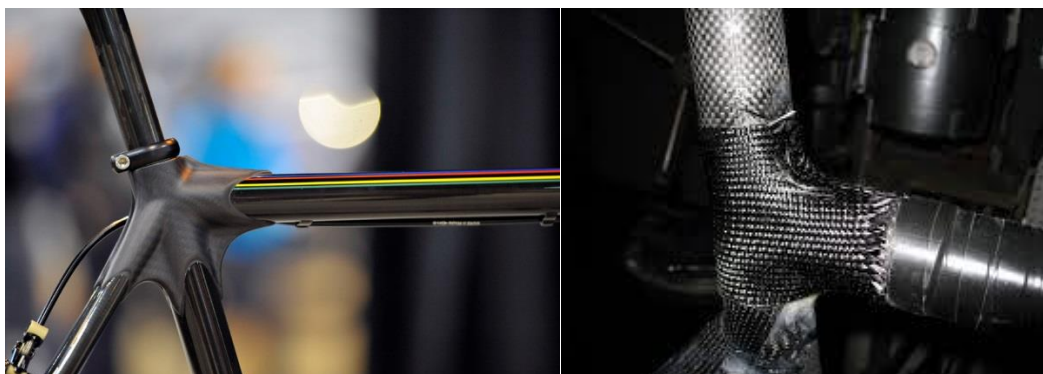


Figura 7 - Exemplos de construção tubo-a-tubo

Construção Monocoque

Este método utiliza apenas um molde em que a estrutura inteira é colocada com a forma desejada. O fluxo de fibras entre os tubos é contínuo, o que permite uma distribuição uniforme do fluxo de tensões ao longo da estrutura, eliminando virtualmente as concentrações de tensão. Como a fibra de carbono pode ser colocada com a precisão desejada, qualquer parâmetro de forma e desempenho pode ser obtido através da combinação da colocação e da forma do molde.

A fibra de carbono pré-impregnada é então recortada em diferentes orientações, como mostrado na figura 8.

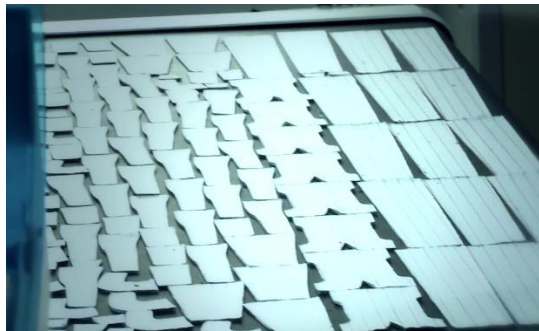


Figura 8 - Fibra de carbono recortada [22]

O elevado interesse em definir porções de pré-impregnado de fibra de carbono, em diferentes orientações resulta da fibra de carbono ter a sua resistência máxima ao longo do comprimento das fibras.

As camadas de fibra de carbono, até duzentas por quadro, são então colocadas sobre um núcleo removível, como se mostra na figura 9, normalmente feito de polímeros especiais, oco, que cria uma caixa de ar interior e que vai estar sobre elevada pressão, por forma a que o quadro fique com uma superfície lisa no seu interior, sem resíduos como resina ou fibras soltas.



Figura 9 - Placa de fibra de carbono a ser colada [22]

Esse nucleo é então colocado dentro de um molde que depois vai ao forno, como se pode ver na figura 10.



Figura 10 - Molde pronto para o forno [22]

No entanto, os quadros não são feitos apenas de um molde, pois integram normalmente várias partes. A construção monocoque é utilizada no triângulo dianteiro, o qual é depois ligado ao triângulo traseiro através do método de tubo-a-tubo, sendo depois o conjunto novamente cozido para criar uma peça única.

A grande vantagem da construção monocoque, relativamente á construção tubo-a-tubo, encontra-se na redução do peso, como se pode ver na figura 11, e no aumento da rigidez da estrutura como referido anteriormente.



Figura 11 - Monocoque Vs. Tubo-a-tubo [22]

3. Vibração e conforto

Analizadas as características dos materiais mais utilizados no fabrico de quadros de bicicleta, conclui-se que é dada grande importância por parte dos engenheiros que criam o quadro ao conforto que este proporcionará. O conforto de um quadro é analisado pela sua capacidade de absorver vibração.

A presença de vibrações conduz, na maioria dos casos, a efeitos indesejáveis tais como: amplitudes de movimento que excedem as previstas no projecto e que podem afetar o bom desempenho do equipamento, excitação das frequências de ressonância da estrutura, dando origem a elevadas tensões que possam levar à sua rotura e situações de instabilidade e desgaste prematuro de componentes .

A influência dos fenómenos vibratórios no comportamento das estruturas tem constituído uma preocupação crescente para o engenheiro. Essa preocupação faz com que haja uma constante necessidade de inovar e otimizar, o que, aliado a certos factores, tais como regulamentação, acções de grupo de consumidores e competitividade, pressionem os industriais a produzir produtos de melhor qualidade com menos vibrações e menos ruído além de mais leves.

Estes requisitos obrigam a encarar as soluções de engenharia de um modo mais detalhado, conduzindo a que o projeto de sistemas e estruturas seja tratado de uma forma científica e a um nível tão complexo quanto a utilização dos meios teóricos e experimentais disponíveis o possibilitem. Em particular, de modo a resolver efetivamente problemas de vibrações, o engenheiro necessita de modelos matemáticos e de técnicas de análise e de cálculo que lhe permitam conhecer as características vibratórias de um sistema mecânico e simular o seu comportamento dinâmico a excitações diversas.

3.1. O quadro como um sistema de absorção de choque

O quadro de uma bicicleta constitui um sistema vibratório. O quadro está colocado entre o utilizador (que está ligado ao quadro pelas mãos, pés e selim) e a superfície. O utilizador aplica cargas cíclicas e as irregularidades do piso geram uma carga dinâmica aleatória. A figura 12 mostra uma vista esquemática da estrutura de um sistema vibratório, que é constituído por um elemento elástico (mola) que armazena a energia potencial e um elemento viscoso (amortecedor) que dissipa energia.

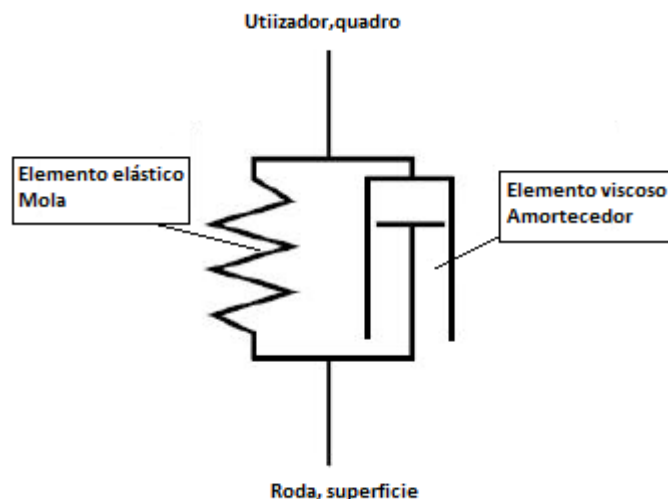


Figura 12 - Sistema vibratório

A vibração é provocada pela imperfeição da superfície do terreno. Estas imperfeições são transmitidas pelos raios ao eixo de cada uma das rodas, os raios estão ligados com o quadro de modo a que cada vibração no eixo é colocada directamente na estrutura. Uma parte da vibração, de mais alta frequência, já é absorvida pelo pneu, aro e raios. Estes três parâmetros podem ser adaptados para minimizar a vibração (ou maximizar o conforto do condutor), devido à rugosidade do terreno.

No entanto, uma série de vibrações está ainda presente no ponto em que a forqueta e a estrutura estão ligados, de modo que a vibração só poderá ser reduzida através da colocação de uma suspensão traseira no quadro ou alterando a sua geometria.

Toda a energia da vibração que não pode ser absorvida pela bicicleta será dissipada pelas partes do corpo do ciclista. Uma possibilidade para ajustar o quadro é alterando a sua geometria, através da inclusão de locais com menor rigidez à flexão em comparação com outros, devido ao peso do ciclista ou às forças aplicadas. Essas deformações irão dar ao utilizador mais conforto.

O efeito do ciclista na bicicleta e a sua percepção de conforto pode ser ilustrada pelo sistema de transmissão passiva. Como mencionado anteriormente o quadro é a mola e amortecedor, respectivamente k [N / m] e c [Ns / m] na figura 13, entre a superfície e o ciclista. Devido à superfície irregular do terreno, existe uma amplitude de vibração $y(t)$ [m]. O ciclista tem uma massa m [kg], que é submetida a uma amplitude $x(t)$ [m].

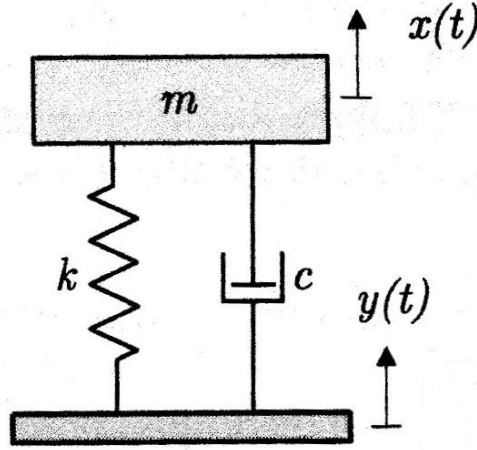


Figura 13 - Sistema vibratório – Transmissão passiva [23]

Após rearranjo, escrevendo a equação diferencial de movimento temos:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky + c\dot{y} \quad (1)$$

Com:

$$x(t) = x_0 e^{j(\omega t + \phi)}, \quad \dot{x}(t) = j\omega x(t), \quad \ddot{x}(t) = -\omega^2 x(t) \quad (2)$$

$$y(t) = y_0 e^{j\omega t}, \quad \dot{y}(t) = j\omega y(t) \quad (3)$$

E,

$$\frac{k}{m} = \omega_n^2, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (4)$$

$$\frac{x}{y} = \frac{j2\xi \frac{\omega}{\omega_n} + 1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + j2\xi \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (5)$$

A transmissão de deslocamento da base para a massa é representada pela razão entre a amplitude x do movimento da massa e a amplitude y do movimento da base e é designada por transmissibilidade de deslocamento TR, dada por:

$$TR = \left| \frac{x}{y} \right| = \frac{x_0}{y_0} = \frac{\sqrt{1 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (6)$$

A figura 14 mostra graficamente como a transmissibilidade (TR) varia em função de $\frac{\omega}{\omega_n}$.

O isolamento de vibração ($TR < 1$) do solo $y(t)$ tem lugar para $\frac{\omega}{\omega_n} > \sqrt{2}$. Perto do pico de ressonância, quando a frequência de excitação do terreno ω e a frequência natural ω_n do sistema são os mesmos, o efeito do amortecimento é significativo nesta região do gráfico. Quanto mais amortecimento o material do quadro tem, mais conforto o utilizador terá. Longe deste pico, o amortecimento não desempenha um papel tão importante.

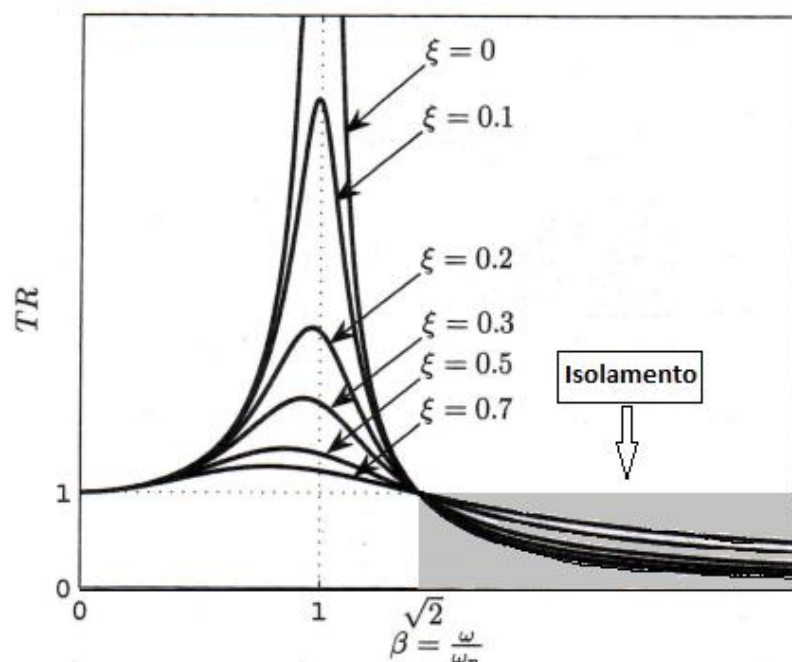


Figura 14 – Transmissibilidade em função da frequência [23]

A partir da análise do gráfico da figura 14, é evidente que a frequência natural ω_n do sistema (bicicleta + utilizador) deve ser mantida o mais baixo possível em comparação com a frequência ω de excitação da estrada. Especialmente a rigidez do quadro terá uma influência sobre a percepção de conforto do ciclista. Um quadro menos rígido vai resultar numa frequência natural mais baixa e, portanto, mais conforto. Deste ponto de vista pode dizer-se que um quadro de alumínio proporciona mais conforto do que uma estrutura de aço, quando as dimensões e diâmetros dos tubos, de ambos são o mesmo, porque o módulo de Young do alumínio é cerca de três vezes menor do que o do aço. Contudo um quadro com baixas frequências de ressonância é também mais fácil de excitar durante a utilização da bicicleta em piso irregular.

Muito importante aqui é notar que apenas a primeira frequência natural do sistema (bicicleta + ciclista) é normalmente considerada e admite-se que apenas uma frequência de excitação (que vem da estrada) ocorre.

Na realidade a situação é muito diferente. Por um lado, a excitação da estrada é um sinal de banda larga, o que significa que ocorre um grande número de frequências. Por outro lado, o sistema tem várias frequências naturais. Esta situação é ilustrada na figura 15 onde se podem ver pelo menos três frequências de ressonância na análise modal experimental de um quadro de bicicleta. Aqui, o amortecimento do quadro não pode ser negligenciado, dado que vários picos de ressonância são encontrados ao longo do espectro de frequências.

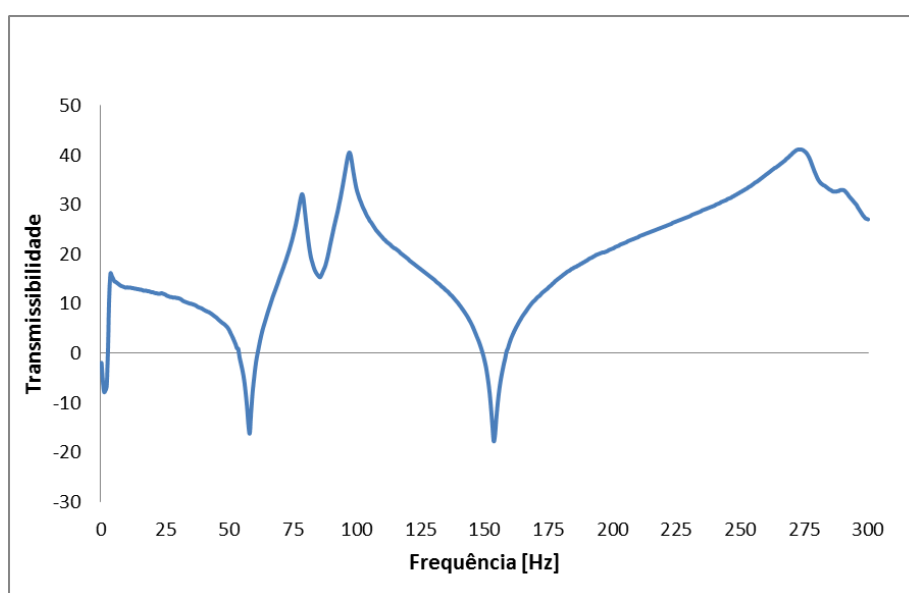


Figura 15 - Transmissibilidade: situação real

3.2. Vibração do corpo

Ao utilizar uma bicicleta para se deslocar o corpo humano é submetido a vibração. Esta vibração é maioritariamente proveniente de irregularidades da superfície. Como se descreveu anteriormente a vibração tem frequências e amplitudes que variam ao longo do espectro. A frequência depende da velocidade e do perfil vertical da superfície. Por exemplo, se o ciclista se deslocar a uma velocidade de 30 km/h num piso com lombas separadas por 40 cm, a frequência de vibração ($f = \frac{v}{\lambda}$) será aproximadamente de 21 Hz. Essa vibração é transmitida ao ciclista nos pontos de contacto com a bicicleta, isto é, as mãos, os pés e o selim. O corpo humano funciona como um sistema de massa-mola-amortecedor e é capaz de absorver grande

parte dessas vibrações. Assim como cada sistema massa-mola-amortecedor, também o corpo humano é mais sensível para um determinado intervalo de frequência. Dependendo dos pontos de contacto do utilizador com a estrutura em vibração, a vibração do corpo está dividida na vibração de corpo inteiro e a vibração na mão.

Para facilitar a avaliação e comparação dos níveis aceitáveis de exposição à vibração foram criadas normas internacionais que devem ser utilizadas também no caso das bicicletas.

3.2.1. Vibração de corpo inteiro – Norma ISO 2631

A norma relacionada com a vibração de corpo inteiro é a ISO 2631 [24]. Esta norma define métodos para a medição da vibração de corpo inteiro em regime periódico, não periódico e transiente. Esta norma define os limites aceitáveis para três situações: a fadiga, o conforto e o limite de exposição (ao nível de implicações na saúde humana) e aplica-se apenas para gamas de frequência entre 1Hz e 80Hz. Segundo a norma, existem quatro factores importantes quando se pretende determinar a resposta do ser humano a uma determinada vibração: a direcção, a intensidade, a frequência e a duração.

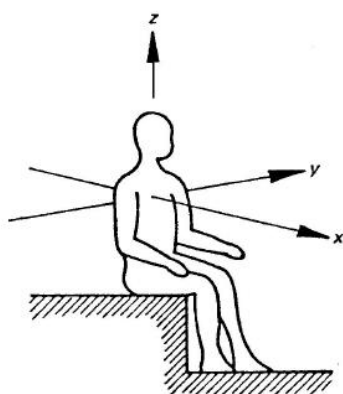


Figura 16 - Eixo de medição para o corpo humano [24]

Em termos de direcção considera-se um sistema coordenado ortogonal tendo como origem a zona do coração e com três eixos: o eixo X, que tem como direcção das costas para o peito; o eixo do Y, que se orienta do lado direito para o lado esquerdo e por ultimo o eixo Z, que tem como direcção dos pés para a cabeça.

Os eixos de medição estão representados por uma pessoa sentada na figura 16. Outras posições descritas na norma são com a pessoa deitada ou em pé, mas apenas a posição sentada se aproxima da posição que se tem quando se anda de bicicleta.

São apresentados os limites de vibração para cada um dos eixos. Esta apresentação está feita graficamente e em tabelas. Como se disse em cima e como é possível ver nos gráficos fornecidos pela norma, existe uma dependência dos valores da vibração (medida em aceleração (m/s^2)) com o tempo de exposição e a intensidade. Pelos gráficos é possível observar que quanto maior for o tempo de exposição (que está na norma definido entre 1 minuto e 24 horas) mais baixo será o limite de vibração aceitável.

Por outro lado parece existir uma gama de frequências onde o ser humano é mais sensível, entre os 4Hz e os 8Hz aproximadamente. De referir que os valores apresentados na norma são para o caso de fadiga e que para se obterem os valores de conforto é necessário multiplicar um coeficiente que indicará que os níveis de conforto serão cerca de um terço dos níveis de fadiga.

3.2.2. Vibração transmitida á mão– Norma ISO 5349-1

Tal como a vibração de corpo inteiro, a vibração transmitida á mão está descrita na norma ISO 5349-1. A vibração da mão é importante quando o ciclista tem as mãos no guiador.

Através da forqueta, cada irregularidade do piso é transmitida ao guiador e posteriormente á mão e braço que têm que absorver esta vibração. A aceleração resultante das vibrações em x, y e z $\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ é utilizada para avaliar essa vibração. A figura 17 apresenta as três direcções de medição e a figura 18, apresenta os limites de exposição á vibração na mão em relação a tempo, frequência, aceleração e velocidade.

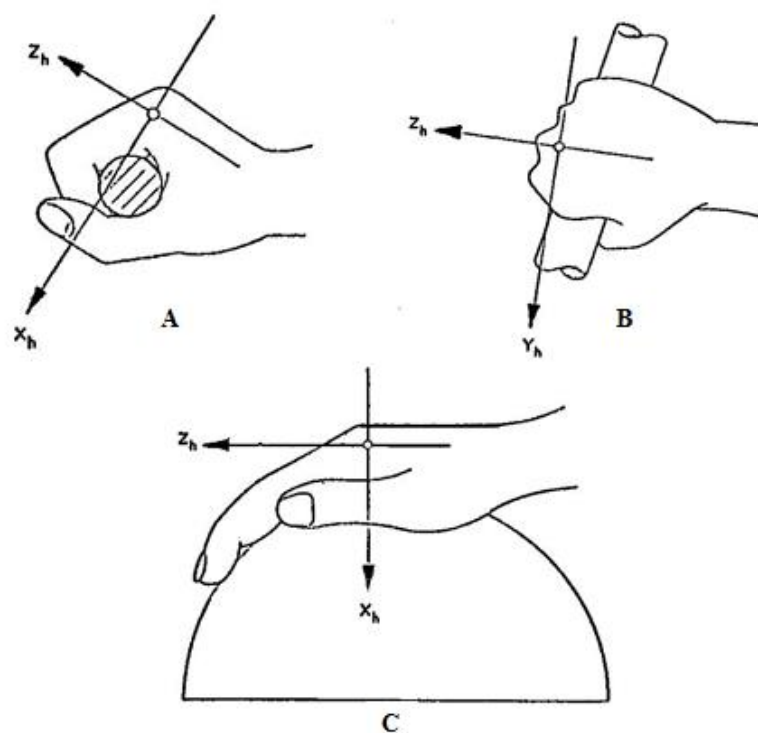


Figura 17 - Direções de medição da vibração transmitida á mão [25]

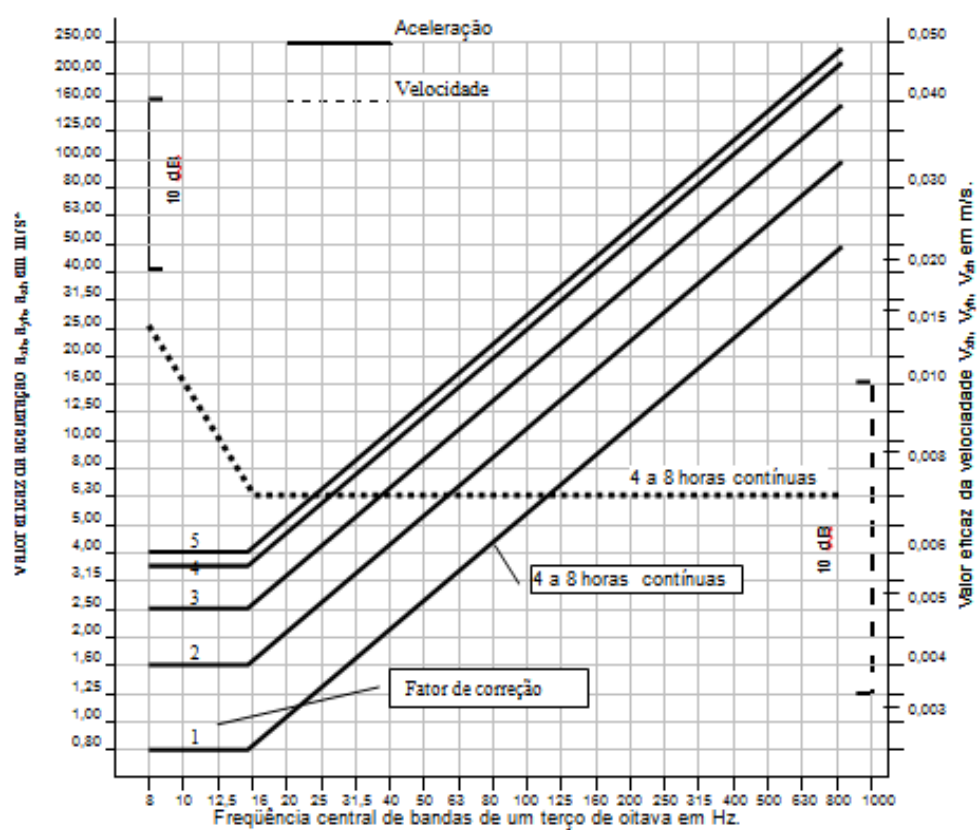


Figura 18 - Limites de exposição de vibração na mão [25]

3.3. Análise modal experimental

Para analisar como o quadro de uma bicicleta reage á vibração, a análise modal é uma das técnicas utilizadas. Através desta técnica é possível analisar como o quadro de uma bicicleta reage a uma solicitação dinâmica.

A análise modal é um processo no qual a estrutura é descrita em termos das suas características naturais, que são a frequência, o amortecimento, e os modos de vibração. Estas três características são chamadas de propriedades dinâmicas de uma estrutura.

A análise modal pode ser melhor explicada através de um exemplo. Numa placa suportada livremente é aplicada uma força a um dos cantos da placa como mostrado na figura 19. A força tem uma amplitude constante, mas varia de um modo sinusoidal. Através de um acelerómetro a resposta da chapa devido à excitação é medida.

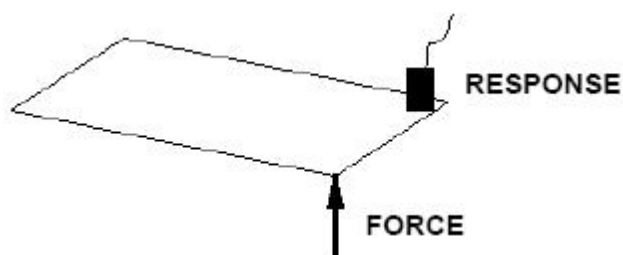


Figura 19 - Análise modal em placa [26]

Como se mostra na figura 20, quando a frequência de vibração aumenta, a amplitude de resposta varia. A resposta amplifica-se quando uma força é aplicada com uma frequência de vibração que se aproxima da frequência natural (ou frequência de ressonância) do sistema e a resposta máxima é atingida quando a frequência de vibração é igual á frequência de ressonância do sistema.

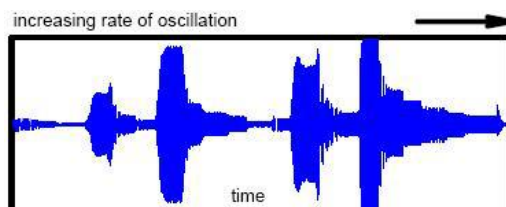


Figura 20 - Resposta de um acelerómetro [26]

Se os dados de tempo forem transformados para o domínio da frequência (via transformação de Fourier), é calculada a função de resposta em frequência (FRF). Nesta função os picos ocorrem nas frequências de ressonância da estrutura. Estes picos ocorrem a

frequências onde a resposta no tempo que se observou é máxima como se pode ver na figura 21.

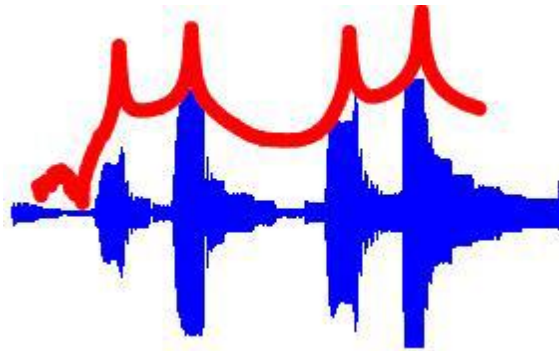


Figura 21 - Resposta no tempo (azul) e Função de resposta em frequência (vermelho) [26]

Além disso todas as frequências de ressonância correspondem também a uma deformação padrão específica da estrutura designada por modo de vibração. Na figura 22 são apresentadas as deformações correspondentes aos modos próprios para a placa, a primeira frequência natural de vibração corresponde a um modo de vibração de flexão. A segunda, a vermelho, é uma deformação de torção. Os modos de vibração três e quatro são, respetivamente, o segundo modo de flexão e o segundo modo de torção.

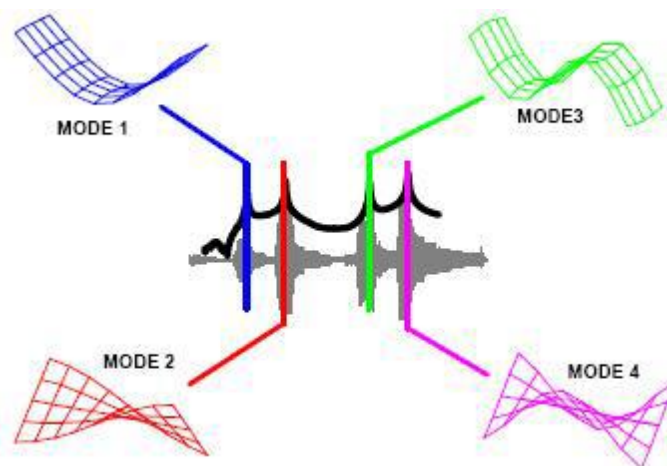


Figura 22 - Deformações padrão para uma placa simples [26]

A frequência natural e o modo de vibração dependem do peso e rigidez da estrutura [26], além das distribuições de rigidez e massa.

Ao projetar uma estrutura é de grande importância saber como a estrutura se irá comportar quando sofre uma solicitação, o que permitirá otimizar o seu *design* e assim melhorar o seu comportamento estrutural.

4. Simulação Numérica

O objectivo de criar no computador um modelo numérico de uma estrutura é a possibilidade de simular o comportamento da estrutura, obtendo a sua resposta a uma carga perante um dado conjunto de restrições impostas pelos apoios. A possibilidade de correlacionar os resultados numéricos com os resultados experimentais enriquece muito a análise. Para uma estrutura complexa é assim possível ajustar o modelo numérico a partir de medições experimentais para as condições simuladas e, posteriormente, verificar como a estrutura se comporta quando uma carga estática ou dinâmica lhe é aplicada.

Quando o modelo numérico do quadro se encontrar ajustado com o modelo real, poderão ser realizadas simulações numéricas em situações diversas para conhecer melhor como o quadro se comporta.

Neste caso o modelo numérico vai ser aferido com o experimental, tentando obter-se valores de tensão semelhantes. Para a recolha experimental dos valores da deformação foi utilizada uma técnica denominada extensometria eléctrica.

4.1. Extensometria

A extensometria é uma técnica experimental que é utilizada para medir as deformações superficiais de um sólido submetido a forças externas, deformando-o no seu domínio elástico.

Um corpo tende a deformar-se quando sofre a acção de uma força externa. No entanto, se esse corpo permanece no seu domínio elástico é possível medir essa deformação de forma repetida, quer em regime estático, quer perante cargas variáveis. Essa deformação é chamada de deformação elástica (ϵ) e é definida como a variação relativa de um comprimento tomado como referência, como é mostrado na Figura 23.

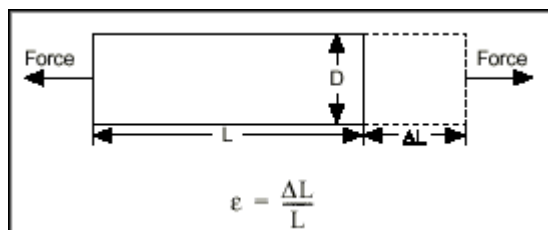


Figura 23 - Definição de deformação elástica [27]

A deformação pode ser positiva (tração) ou negativa (compressão). Embora adimensional, a deformação é constantemente expressa em *microstrain* ($\mu\epsilon$), que é $\epsilon \times 10^{-6}$. Quando uma barra é deformada por uma força uniaxial, como na figura 23, um fenómeno conhecido como efeito de Poisson faz com que o diâmetro da barra, D , se contraia na direcção transversal ou perpendicular à direcção de carregamento. A grandeza desta contração transversal é uma propriedade do material indicada pelo coeficiente de Poisson. O coeficiente de Poisson ν de um material é definido como a razão negativa da deformação na direcção transversal (perpendicular á força) e a deformação na direcção axial (paralela á força), ou $\nu = \epsilon_t / \epsilon$.

Embora existam vários métodos de medir deformação, o mais comum é com um extensómetro.

Existem vários tipos de extensómetros, mecânicos, pneumáticos, óticos, etc. contudo, os mais utilizados consistem numa resistência elétrica muito fina, fabricada sobre uma base isolante, conforme mostrado na figura 24, que é depois colada sobre o corpo de teste. Este pequeno dispositivo é montado no local onde se vai medir a deformação. Tal como o objecto se deforma, a folha metálica também se deforma, fazendo com que a sua resistência eléctrica mude e, desta forma, copie a deformação do objeto.

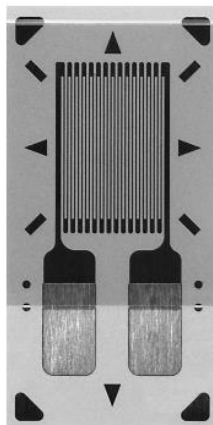


Figura 24 – Grelha de um Extensómetro de folha

Esta pequena alteração na resistência pode ser medida geralmente através do que é chamado uma ponte de Wheatstone, como se pode ver na Figura 25. Os valores de resistência típicos para extensómetros são 120, 350 ou 1000 Ω . [27]

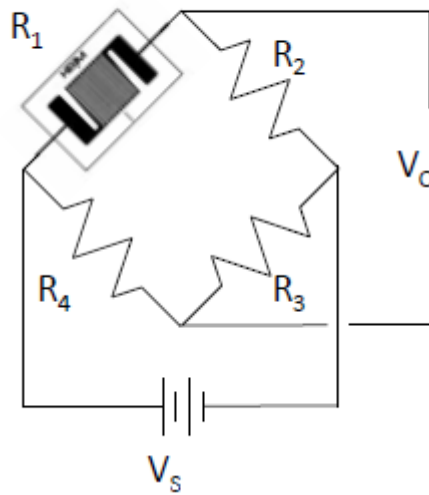


Figura 25 - Ponte de Wheatstone [27]

Existem vários tipos de montagem em ponte, a da figura 25 é uma montagem em quarto de ponte, tal como a que foi utilizada neste trabalho, em que uma das quatro resistências é o extensômetro e as outras três são impedâncias com a mesma resistência que o extensômetro.

Durante a medição, a deformação do corpo provoca uma variação da resistência R_1 . Em consequência desta variação da resistência ocorrerá um desequilíbrio da ponte provocando uma variação na tensão de saída V_O . A tensão V_O pode ser obtida através da equação:

$$V_0 = V_S * \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (7)$$

Desta equação, é aparente que quando $R_1/R_2 = R_4/R_3$, a tensão de saída V_O é zero. Sob estas condições, dizemos que a ponte está balanceada, ou em equilíbrio. Qualquer mudança de resistência em qualquer braço da ponte resulta numa tensão de saída diferente de zero.

Um parâmetro fundamental do extensômetro é a sua sensibilidade à deformação, expressa quantitativamente como *Gage Factor* (GF). O *Gage Factor* é definido como a razão da variação fracional na resistência elétrica para a mudança fracional no comprimento, isto é, a deformação. Assim sendo é definido pela seguinte fórmula:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (8)$$

Relacionando agora as duas equações acima e assumindo que $R_1 = R_2$ e $R_3 = R_4$, a equação da ponte, pode ser re-escrita para expressar V_o/V_s como uma função da deformação. [24]

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{GF * \varepsilon}{4} * \left(\frac{1}{1 + GF * \frac{\varepsilon}{2}} \right) \quad (9)$$

A relação tensão-deformação (Lei de Hooke)

Se um dado material é tracionado, a força aplicada no material é proporcional à deformação causada enquanto a solitação se mantiver na região elástica, mantendo uma relação constante entre a magnitude da força externa e a quantidade de deformação. Isto implica que a força para contrabalançar a ação externa é gerada internamente no material, e a magnitude de força por unidade de área é chamada de tensão, ou tensão mecânica. Comumente os materiais tem a propriedade de se alongar quando tracionados e de encolher quando comprimidos. Supondo que um material é tracionado, e a quantidade de alongamento seja dada por Δl enquanto que o comprimento original seja l . A relação de alongamento $\frac{\Delta l}{l}$ é chamada deformação,

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (10)$$

O gráfico da figura 26 mostra a relação entre tensão e deformação de um corpo submetido a um carregamento de tração. A tensão é proporcional à deformação entre a origem e o ponto a, onde uma inclinação aproximadamente linear é obtida como mostra a figura 26. Esta é a chamada região elástica onde se aplica a lei de Hooke. A relação tensão-deformação na região elástica é dada pela seguinte equação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (11)$$

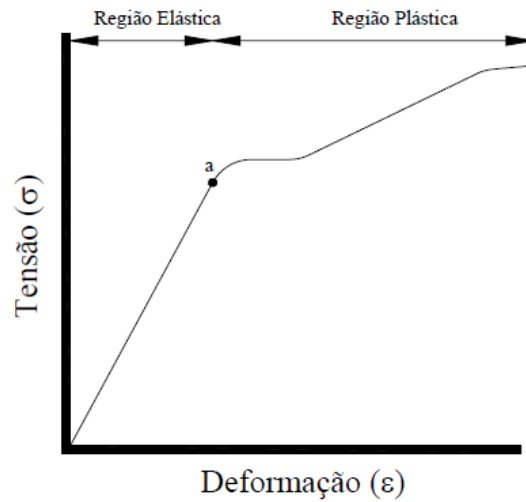


Figura 26 - Curva tensão-deformação

4.2. Modelação do quadro

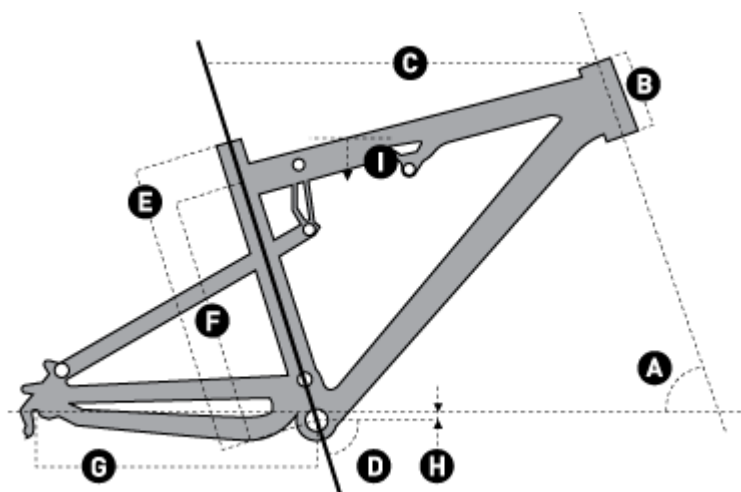
Para a modelação do quadro da bicicleta o primeiro passo consistiu em escolher o modelo da bicicleta que se pretende estudar. Neste caso e por se encontrar disponível a bicicleta escolhida foi uma Scott Spark, igual à apresentada na figura 27.

Esta bicicleta de suspensão total tem a particularidade de permitir que a suspensão traseira seja bloqueada, tornando o quadro rígido. Possibilitando a análise e comparação do seu comportamento com a suspensão bloqueada (quadro rígido) e desbloqueada (quadro com um grau de liberdade).



Figura 27 - Modelo utilizado - Scott Spark 20 [28]

A modelação do quadro fez-se recorrendo aos manuais da marca, procurando a geometria do quadro. A figura 28 apresenta a geometria do quadro, sendo que o tamanho do quadro é um M, de acordo com a referência do fabricante.



Size	Units	S	M	L	XL
A / Head Angle	degrees	69.5°	69.8°	70.0°	70.0°
B / Head Tube	mm	110	120	140	160
	in	4.3	4.7	5.5	6.3
C / Top Tube Horizontal	mm	555	585	610	640
	in	21.9	23	24	25.2
D / Seat Angle	degrees	73.5°	73.5°	73.5°	73.5°
E / BB center->top seattube	mm	400	450	490	540
	in	15.7	17.7	19.3	21.3
F / BB center->toptube center	mm	337	387	429	479
	in	13.3	15.2	16.9	18.9
G / Chainstay	mm	422	422	422	422
	in	16.6	16.6	16.6	16.6
H / BB offset	mm	-10	-10	-10	-10
	in	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
I / Standover Height	mm	727	758	789	825
	in	28.6	29.8	31.1	32.5
Wheel Base	mm	1055	1085	1106	1137
	in	41.5	42.6	43.5	44.8
Stem Length	mm	90	90	100	110

Figura 28 - Geometria do quadro [28]

Retiradas as medidas fornecidas pelo fabricante, verificou-se que eram insuficientes para se proceder á criação do modelo numérico, sendo necessário recorrer ao modelo real e

retirar mais algumas dimensões. O *software* utilizado para a modelação foi o SolidWorks e o resultado final apresenta-se na figura 29.

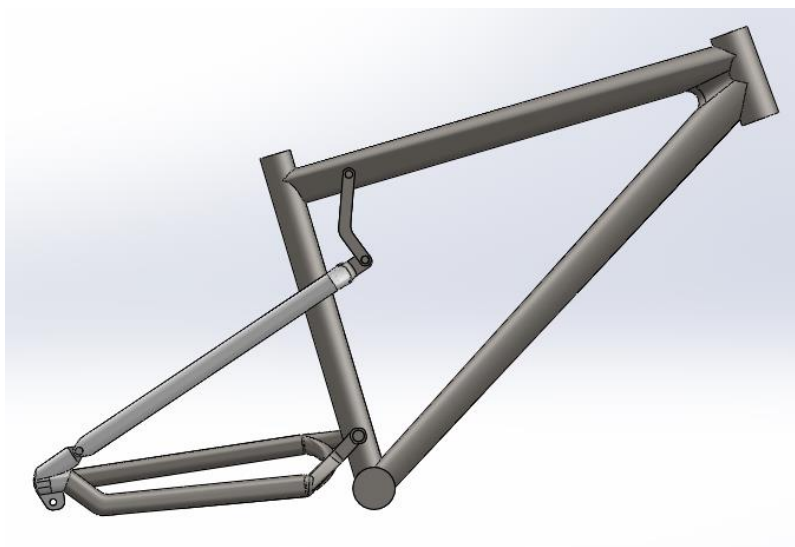


Figura 29 - Quadro - Modelo numérico em CAD

4.3. Validação do modelo numérico

O desenho em CAD foi transposto para um programa de simulação numérica por elementos finitos, ANSYS. Neste último software foi criado o modelo numérico, que foi depois validado através da análise estática para medição das tensões. O primeiro passo consistiu na utilização do modelo numérico para obter informação sobre as deformações no quadro identificando os melhores pontos para colocar os extensómetros.

4.3.1. Simulação numérica

No primeiro ensaio considerou-se que um ciclista se deslocava na bicicleta sem pedalar. Como condições de fronteira e visto que o modelo não possuía selim nem pedais, considerou-se que o peso do ciclista (a vermelho na figura 30) era de 70 kgf e era aplicado no ponto superior do tubo onde se encaixa o selim e no eixo pedaleiro. A distribuição do peso foi de 50kgf para o selim e 20kgf para o eixo pedaleiro. Quanto aos apoios (a azul na figura 30), considerou-se que o quadro estava fixo no tubo da caixa de direcção e nos pontos onde a roda traseira é encaixada no quadro da bicicleta.

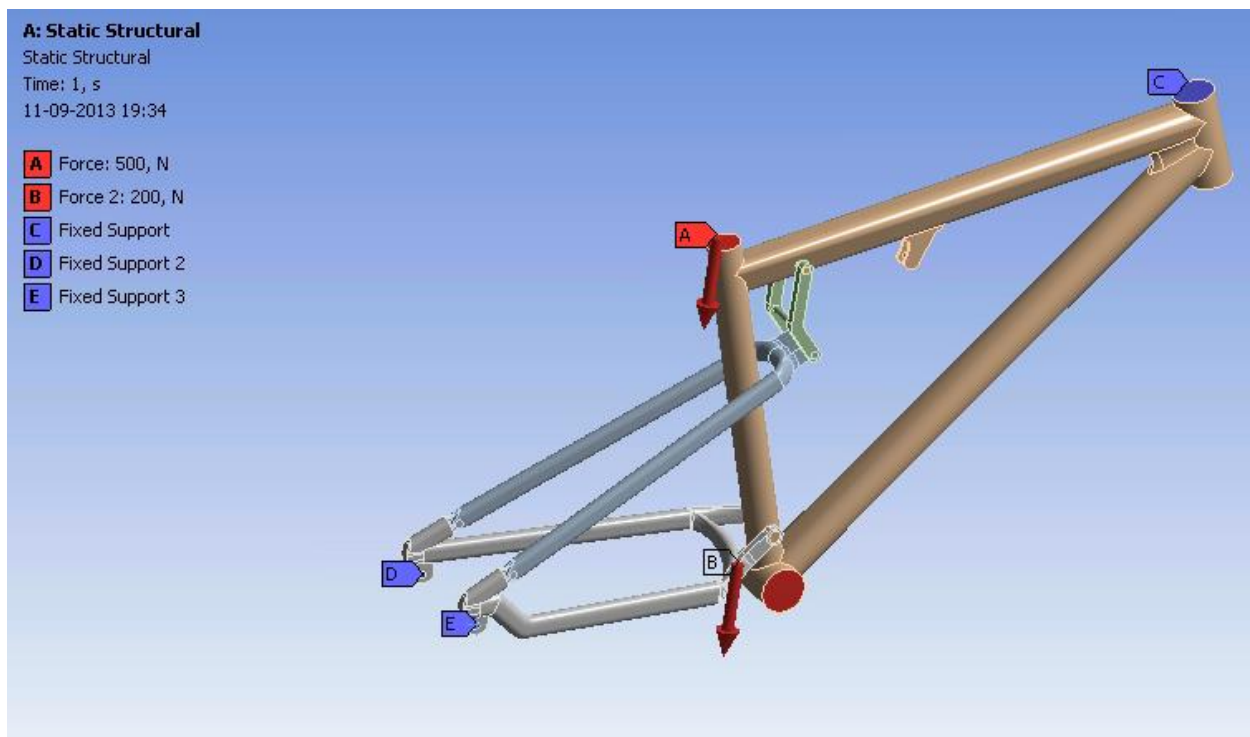


Figura 30 - Condições de fronteira – primeiro ensaio

O resultado do ensaio apresenta-se na figura 31.

Após a realização do ensaio analisou-se a deformação obtida no quadro e procedeu-se á escolha dos locais onde se colocariam os extensómetros no modelo real.

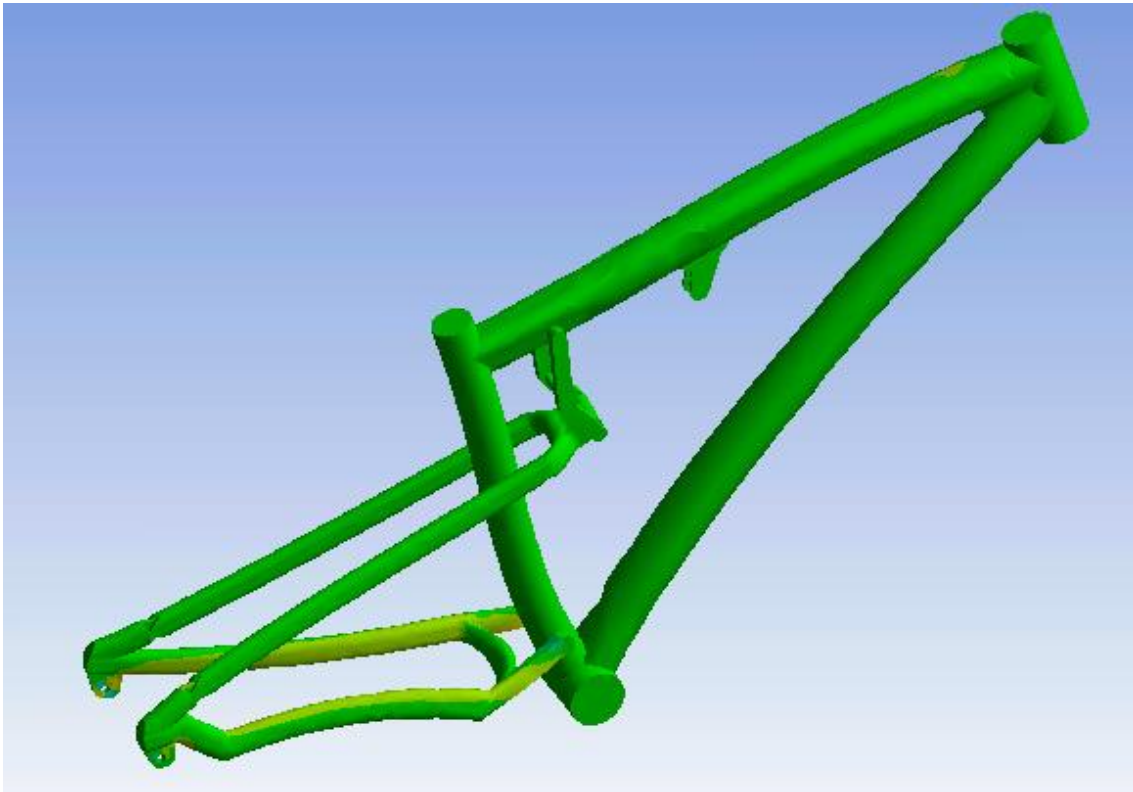


Figura 31 - Deformação do quadro – primeiro ensaio

4.3.2. Colocação dos extensómetros

Possuía-se quatro extensómetros com uma resistência de 120Ω da marca Micro-Measurements. Os locais onde se colocaram os extensómetros estão apresentados na figura 32. Colocaram-se dois deles na escora inferior (azul e verde) e dois na escora superior (branco e vermelho). Como a escora superior é simétrica, um extensómetro seria colocado na parte superior da escora e outro na parte inferior, por forma a não criar uma situação redundante. A escora inferior é assimétrica optando-se por comparar a tensão em cada um dos braços da escora.

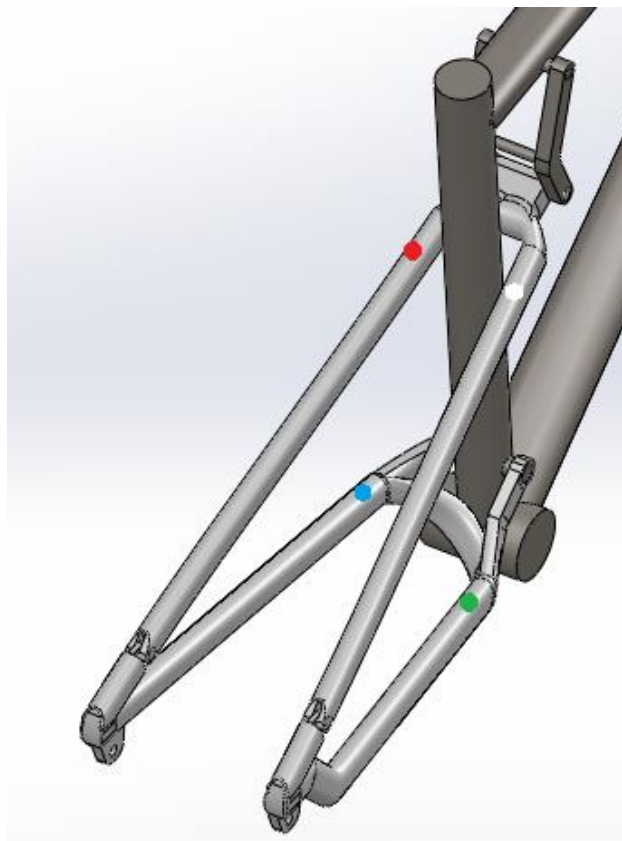


Figura 32 - Locais para colocação dos extensômetros

Antes de colocar os extensômetros preparou-se a superfície. Foi necessário lixar, para retirar o verniz e a tinta, e desgordurar para que os extensômetros ficassem colados correctamente e obtermos uma medição de qualidade. A figura 33 apresenta a superfície já preparada para a colagem do extensómetro.



Figura 33 - Superfície pronta para colagem do extensómetro

Depois de colados os extensómetros, verificou-se que estes estavam a medir correctamente, recorrendo-se a um indicador de tensão, Strain Indicator P-3500, que converte o sinal eléctrico em tensão, para verificar a estabilidade do sinal. A figura 34 apresenta o indicador de tensão com um extensómetro a ser verificado. Nesta fase foi verificada a estabilidade do extensómetro às variações de temperatura.



Figura 34 - Verificação da estabilidade do sinal

4.3.3. Análise estática da deformação do quadro

Verificado o correcto funcionamento de todos os extensómetros, efectuou-se o ensaio do modelo experimental com as condições de fronteira utilizadas para a simulação numérica. Recorreu-se a um sistema de aquisição de dados da National Instruments, constituído por um chassis NI9188 e um módulo de 8 canais NI9235. O *software* utilizado para medição foi o LabView, também da National Instruments, que permitiu obter o sinal de deformação dos quatro extensómetros simultaneamente. Na figura 35 apresenta-se o sistema pronto para a medição.



Figura 35 - Sistema pronto para a medição

Os resultados obtidos apresentam-se na figura 36.

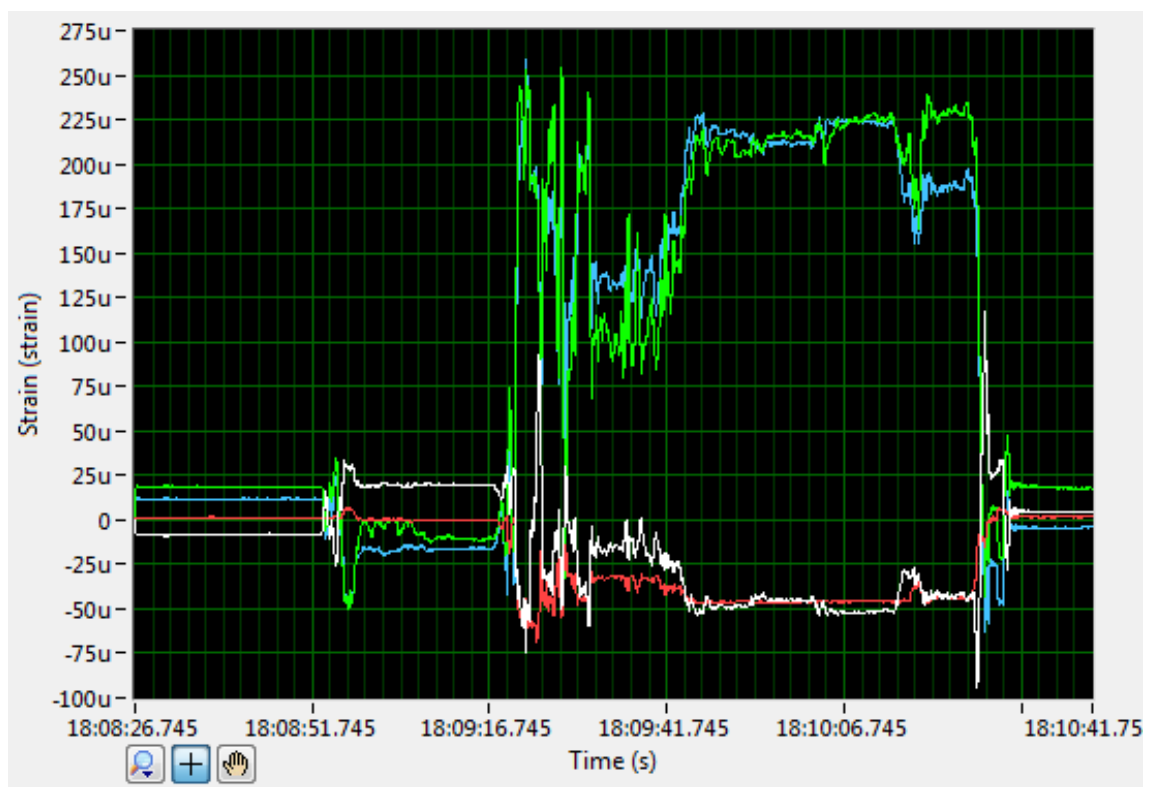


Figura 36 - Resultados ensaio experimental

No gráfico é possível observar o momento em que a carga foi colocada, estabilizada e retirada. Para a análise considerou-se o momento em que o sinal se manteve estável durante um periodo de tempo, assinalado, pelo rectângulo laranja, na figura 37.

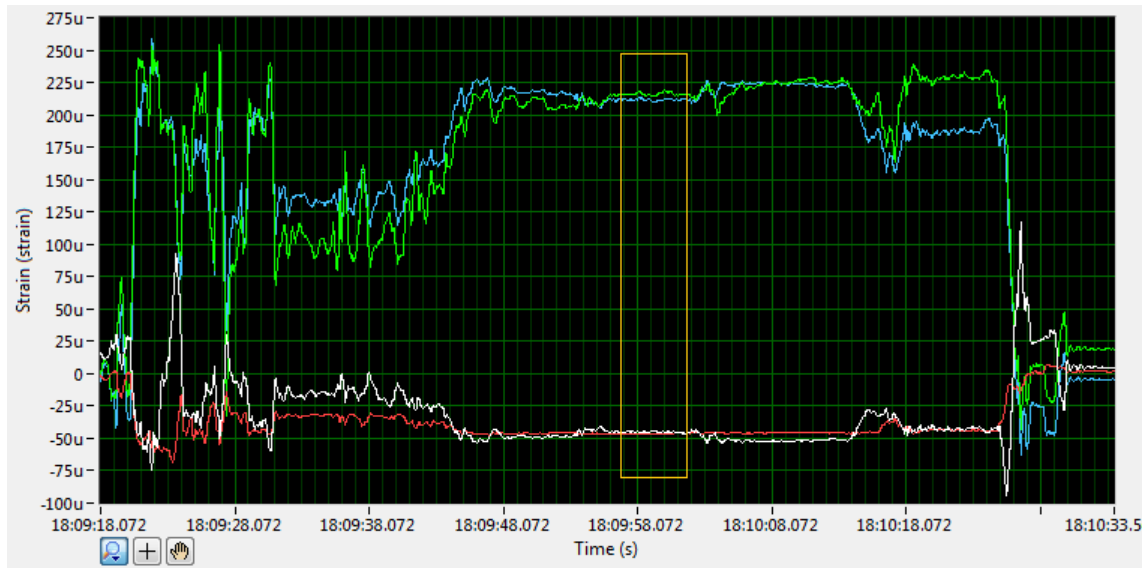


Figura 37 - Gráfico de tensão, modelo experimental.

Quanto á simulação numérica os valores de deformação obtidos para os pontos seleccionados foram os apresentados na figura 38.

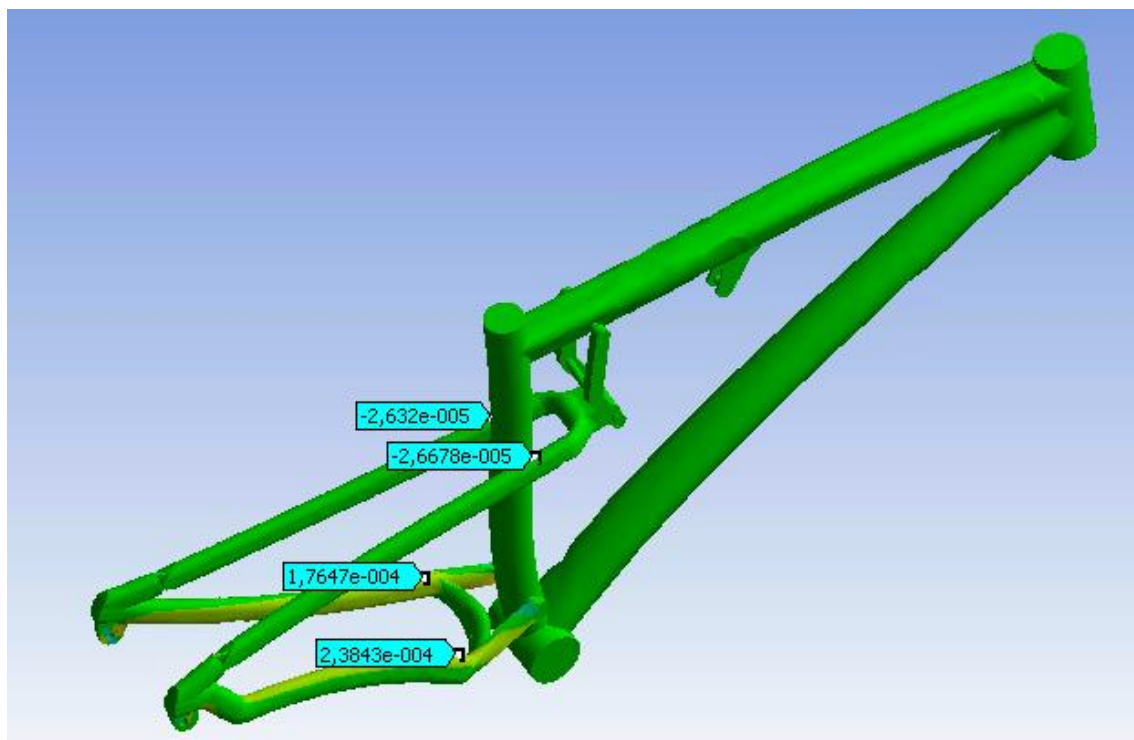


Figura 38 - Resultados simulação numérica.

A tabela 1 apresenta os valores de deformação obtidos nos dois modelos, experimental e numérico.

Tabela 1 - Valores de deformação - Modelo experimental e numérico

Extensômetro	Deformação ($\mu\epsilon$) Ensaio Experimental	Deformação ($\mu\epsilon$) Simulação Numérica	Erro
Vermelho	-48	-26	45%
Branco	-48	-26	45%
Azul	210	176	16%
Verde	215	238	10%

Os resultados obtidos não permitiram correlacionar totalmente o modelo numérico com o modelo experimental.

Apesar de na escora superior se obter deformações iguais nos dois braços para os dois ensaios, o que permitiria que se correlacionasse os resultados, na escora inferior existe uma diferença considerável entre os dois ensaios, não se conseguindo correlacionar os resultados da mesma forma.

Vários factores poderão estar na origem desta diferença, entre eles, as condições de fronteira e o modelo numérico, que poderão não ser semelhantes nas duas situações.

A análise dinâmica do quadro fornecerá mais alguma informação acerca da qualidade do modelo numérico criado, através da determinação e comparação das frequências naturais de vibração do quadro.

5. Comportamento dinâmico do quadro

O principal objectivo deste capítulo é avaliar o comportamento dinâmico do quadro da bicicleta. Através da análise modal experimental, a frequência natural e os modos de vibração do quadro serão estimados e calculados, possibilitando ver como a estrutura se deforma quando uma força lhe é aplicada.

Depois serão analisadas as deformações do quadro em duas situações diferentes, numa situação em que se pedala e noutra em que se efectua um salto, através de ensaios experimentais comparando-se um caso particular para cada uma das situações, o caso de a suspensão traseira estar bloqueada ou desbloqueada.

Como mencionado no capítulo 3 (parágrafo 3.3), a análise modal experimental requer uma força que interaja com a estrutura (aqui o quadro da bicicleta), logo irá ocorrer uma vibração forçada.

Teoricamente para a análise modal experimental pode-se dizer que se vai determinar a função de resposta em frequência para um sistema de n graus de liberdade em regime forçado.

5.1. Sistema de n graus de liberdade em regime forçado

A figura 39 representa o diagrama de corpo livre de um sistema de n graus de liberdade em regime forçado descrito por n coordenadas lineares $x_i(t)$ $i = 1, \dots, n$ que definem as posições das massas m_i $i = 1, \dots, n$, em qualquer instante t , a partir das respectivas posições de equilíbrio estático.

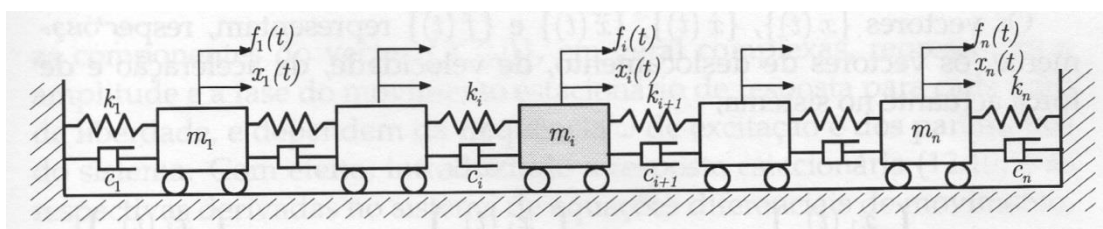


Figura 39 - Diagrama de corpo livre - Sistema com n graus de liberdade [23]

As equações de movimento do sistema constituem um sistema de n equações diferenciais ligadas ou acopladas. As equações diferenciais de movimento escrevem-se, em notação matricial,

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [c]\{\dot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (12)$$

onde $[m]$, $[c]$ e $[k]$ representam, as matrizes de massa, de amortecimento e de rigidez do sistema.

Os vectores $\{x(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{\ddot{x}(t)\}$ e $\{f(t)\}$ representam, respectivamente, os vectores de deslocamento, de velocidade, de aceleração e de força actuante no sistema.

A caracterização completa do movimento do sistema, para além das equações diferenciais do movimento, requer, igualmente, o conhecimento das condições iniciais de deslocamento $\{x(0)\}$ e de velocidade $\{\dot{x}(0)\}$.

Para uma solicitação harmónica síncrona de frequência ω , as equações de movimento escrevem-se, em notação matricial,

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [c]\{\dot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{F\}e^{j\omega t}, \quad (13)$$

onde o vector solicitação $\{f(t)\}$ vale,

$$\{f(t)\} = \{F\}e^{j\omega t} \quad (14)$$

Admitindo uma resposta em regime permanente ou estacionário do tipo,

$$\{x(t)\} = \{X(\omega)\}e^{j\omega t}, \quad (15)$$

as componentes do vector $\{X(\omega)\}$, em geral complexas, representam a amplitude e a fase do movimento estacionário de resposta para cada grau de liberdade, e dependem da frequência de excitação e dos parâmetros do sistema. Com efeito, introduzindo a resposta estacionária e as respectivas derivadas no sistema de equações diferenciais de movimento, obtém-se o seguinte sistema de equações algébricas,

$$[-\omega^2[m] + j\omega[c] + [k]]\{X(\omega)\} = \{F\} \quad (16)$$

cujas soluções são os vectores $\{X(\omega)\}$. Definindo as funções de impedância $z_{rs}(\omega)$, $r, s = 1, 2, \dots, n$ da seguinte forma,

$$z_{rs}(\omega) = -\omega^2 m_{rs} + j\omega r_{rs} + k_{rs} \quad (17)$$

o sistema de equações algébricas pode escrever-se,

$$[Z(\omega)] \{X(\omega)\} = \{F\} \quad (18)$$

onde a matriz $[Z(\omega)]$ é designada por matriz impedância ou matriz de rigidez dinâmica do sistema. Premultiplicando pela matriz inversa da matriz impedância, $[Z(\omega)]^{-1}$, determina-se o vector de amplitudes $\{X(\omega)\}$,

$$\{X(\omega)\} = [z(\omega)]^{-1}\{F\} \quad (19)$$

Através do vector de amplitudes observa-se os picos de frequência da estrutura, esses picos serão as frequências naturais de vibração.

5.2. Análise modal experimental

Para se determinar as frequências naturais e os modos de vibração de forma experimental, é necessário obter uma função de resposta em frequência (FRF), depois de determinada a função de resposta em frequência utiliza-se um método denominado, método da amplitude de pico, para identificar os parâmetros modais da estrutura. Neste método as frequências naturais são tomadas simplesmente da observação dos picos da curva de magnitude da resposta.

Antes de qualquer ensaio experimental é de grande importância e utilidade efetuar uma simulação numérica. Prevendo-se como a estrutura se vai deformar e vibrar e retirando algumas conclusões acerca dos pontos de colocação do acelerómetro para a medição, os pontos anti-nodais, e dos pontos onde se vai excitar a estrutura.

5.2.1. Simulação numérica

A simulação numérica foi efectuada através do software Ansys, o modelo numérico foi constituído por 23399 nós e 11803 elementos de malha. Como dados de entrada colocou-se, a densidade, o modulo de Young e o coeficiente de Poisson. As condições de fronteira são livres. Os resultados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Frequências naturais calculadas no Ansys

Frequência natural	Resultados [Hz]
1	81,75
2	93,71
3	231,93
4	271,10
5	313,27
6	371,40
7	382,75
8	399,46
9	431,56
10	463,94

As dez primeiras frequências naturais estão apresentadas na tabela 2. Como exemplo, apresenta-se os três primeiros modos de vibração nas figuras 40, 41 e 42 respetivamente. Os modos de vibração 1 e 2 são modos de flexão, o modo de vibração 3 é um modo de torção.

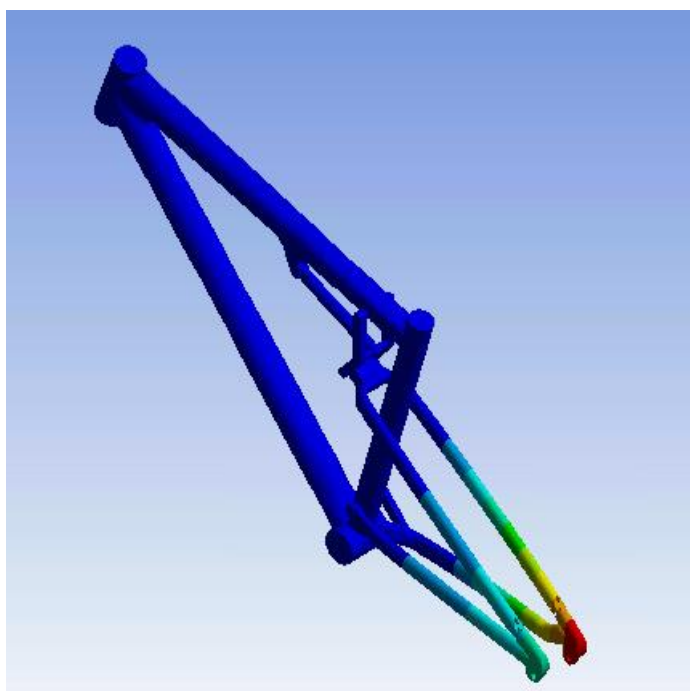


Figura 40 - 1º modo de vibração - Flexão

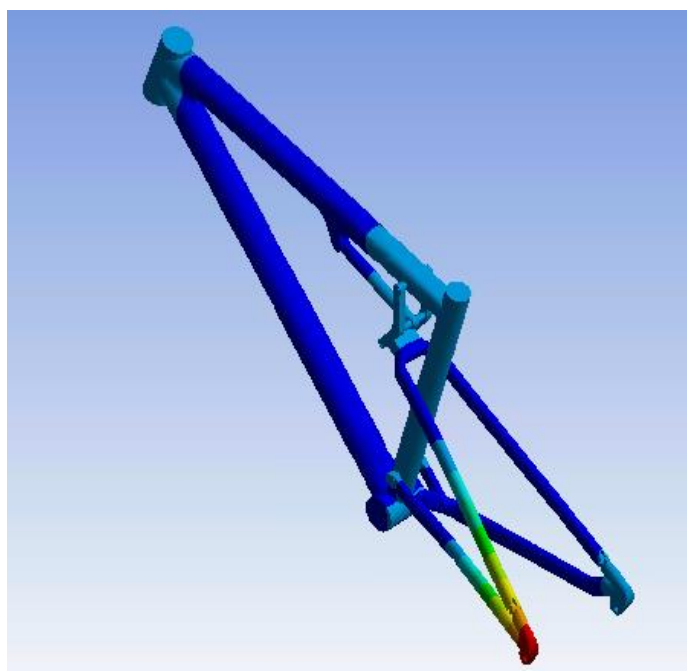


Figura 41 - 2º modo de vibração - Flexão

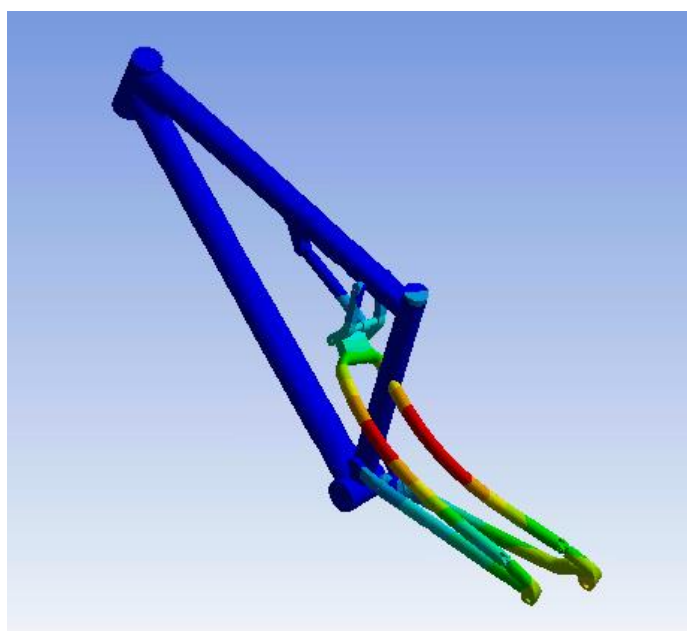


Figura 42 - 3º modo de vibração - Torção

Conclui-se que a escora traseira é o elemento que sofre maior deformação, devendo-se isso, á geometria do quadro e possivelmente ao diâmetro dos tubos do quadro.

5.2.2. Ensaio experimental

Efetuada a simulação numérica e determinados os pontos onde se colocaria o acelerómetro, demonstrados na figura 43, partiu-se para a realização do ensaio experimental.

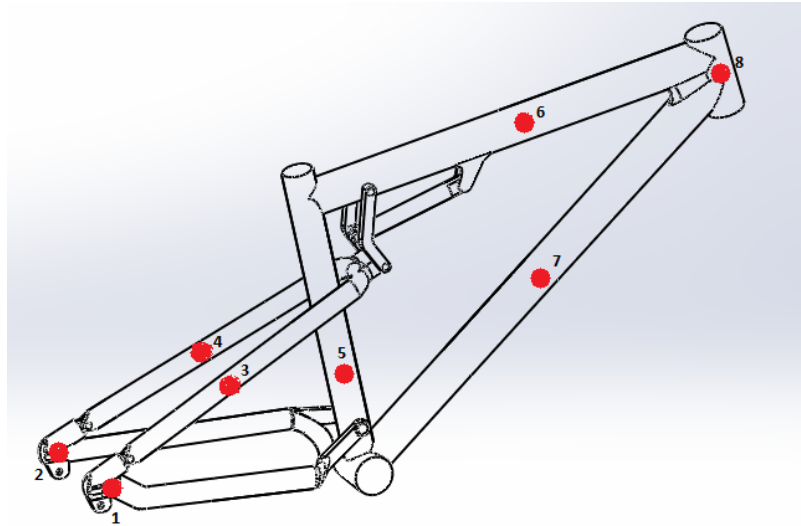


Figura 43 - Pontos de colocação do acelerómetro

Para o ensaio experimental, primeiro suspendeu-se o quadro da bicicleta através de um elástico como pode ser visto na figura 44. Este tipo de suspensão aproxima-se muito das condições de fronteira livres criadas na simulação numérica.



Figura 44 - Configuração do teste – Condições de fronteira livre

O acelerómetro da marca Bruel & Kjaer modelo 4393, de massa sísmica (não adiciona massa significativa ao sistema) colocou-se num dos pontos anti-nodais. Na figura 45 apresenta-se o acelerómetro colocado no quadro, neste caso no ponto 2 da figura 43.

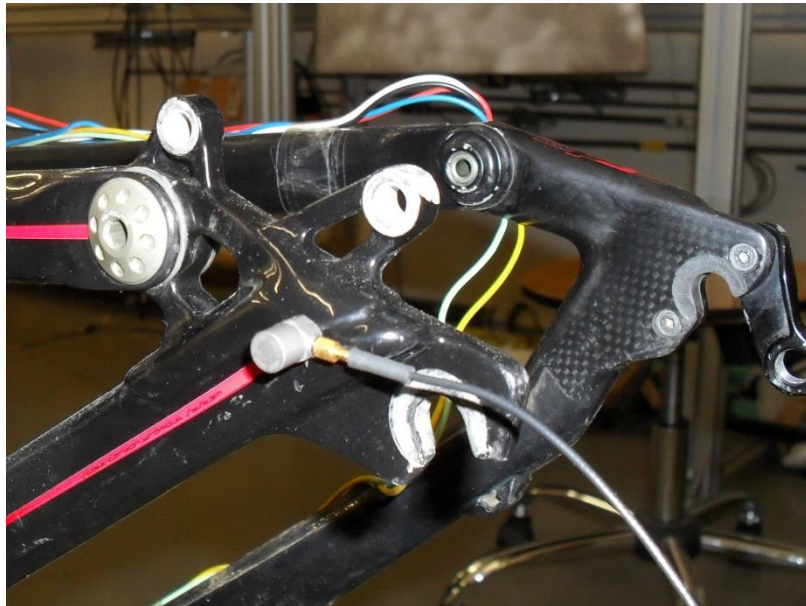


Figura 45 - Acelerómetro colocado no quadro

O sinal para medição da resposta em aceleração foi amplificado por um amplificador da marca Bruel & Kjaer modelo 2525 e foi utilizado um martelo de impacto também da marca Brüel & Kjaer, modelo 8200, apresentado na figura 46, para excitar a estrutura, ligado a um amplificador onde o sinal é condicionado e amplificado.



Figura 46 - Martelo de impacto Brüel & Kjaer, modelo 8200

O sinal é posteriormente obtido no *software* LabView. Os resultados para cada um dos pontos apresentam-se seguidamente, nas figuras 47,48,49,50,51,52,53 e 54.

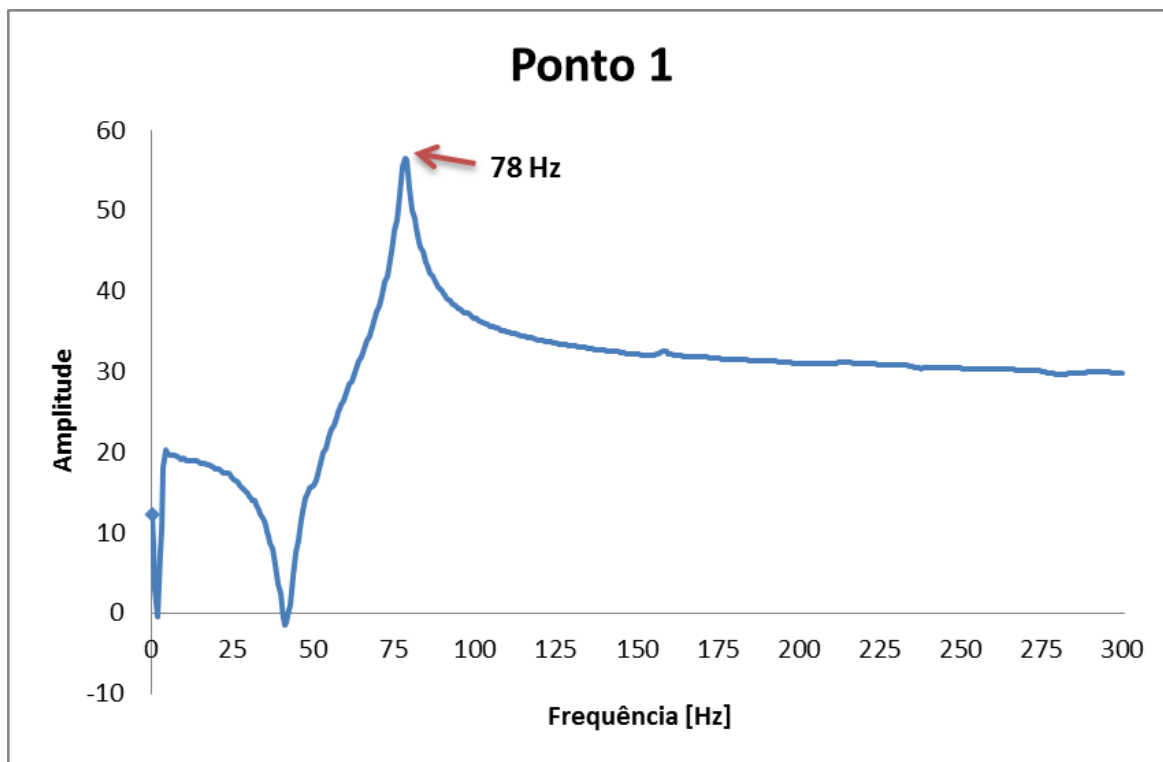


Figura 47 - Função de resposta em frequência - Ponto 1

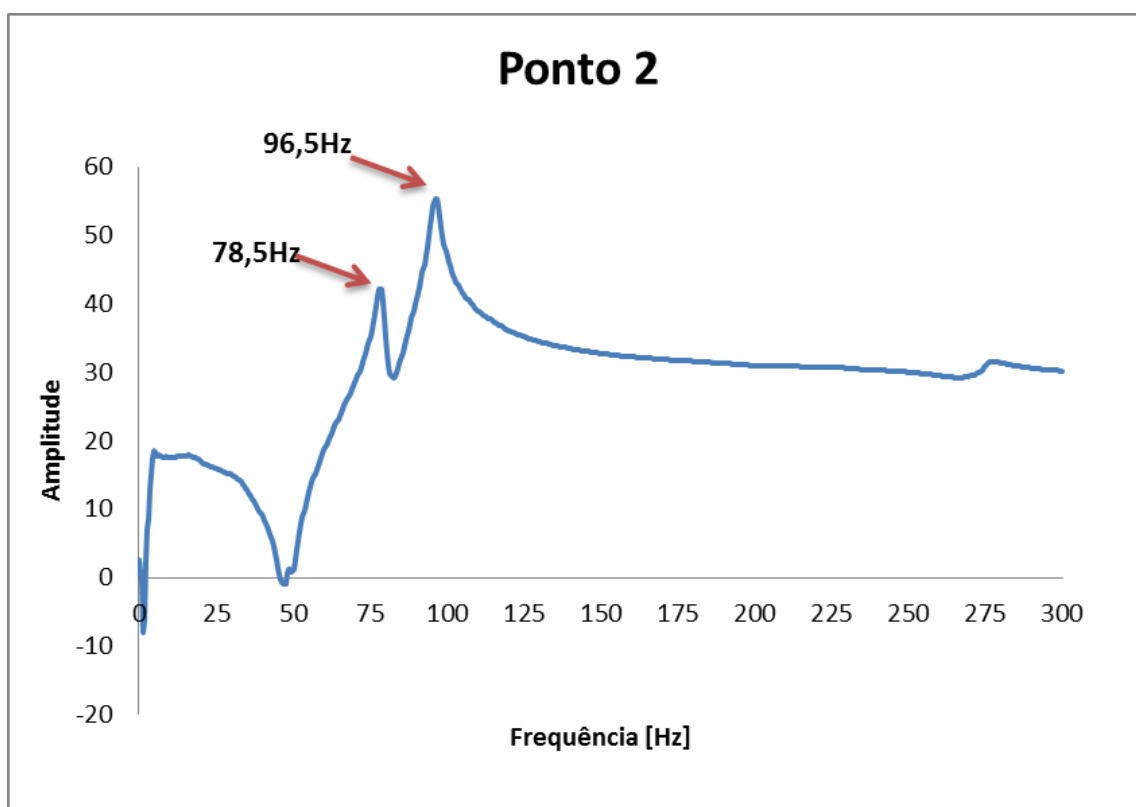


Figura 48 - Função de resposta em frequência – Ponto 2

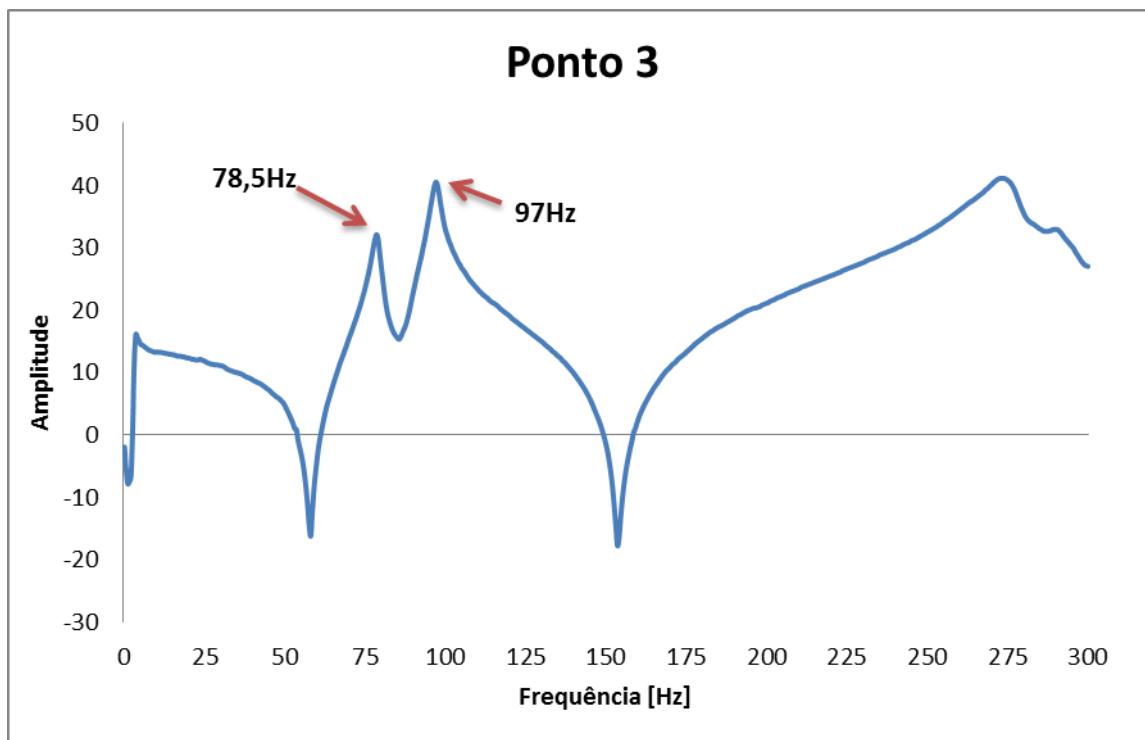


Figura 49 - Função de resposta em frequência - Ponto 3

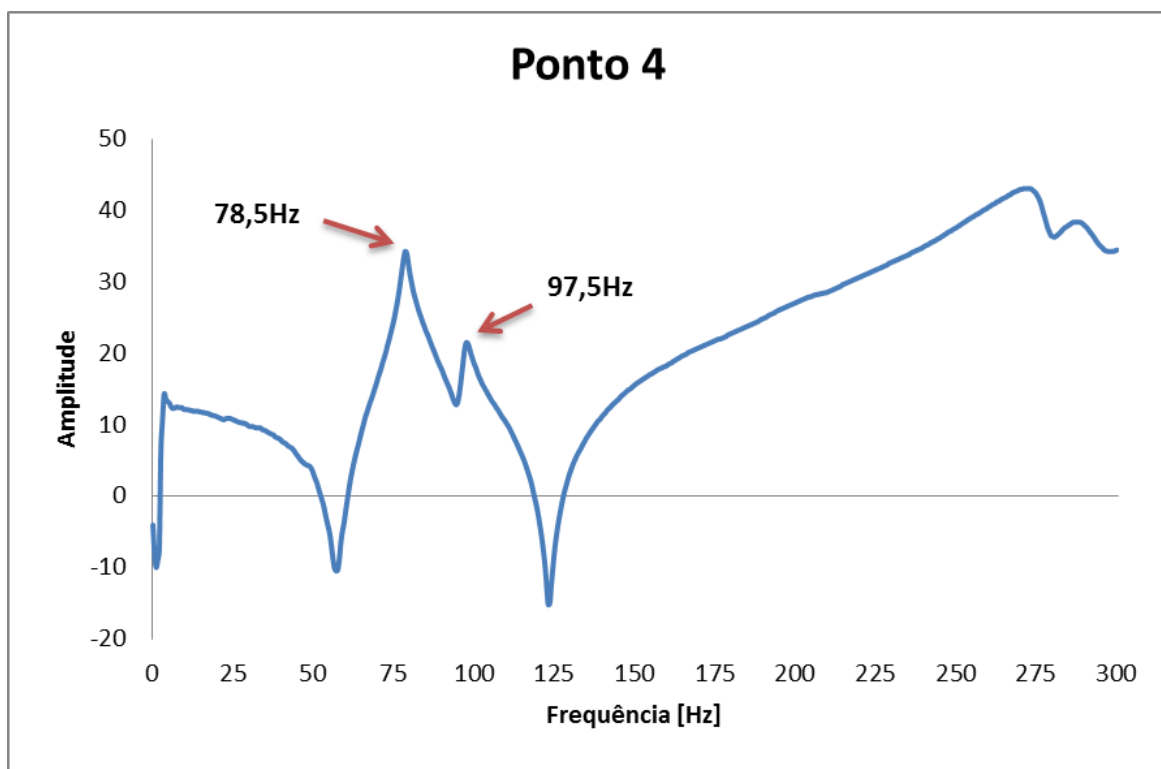


Figura 50 - Função de resposta em frequência - Ponto 4

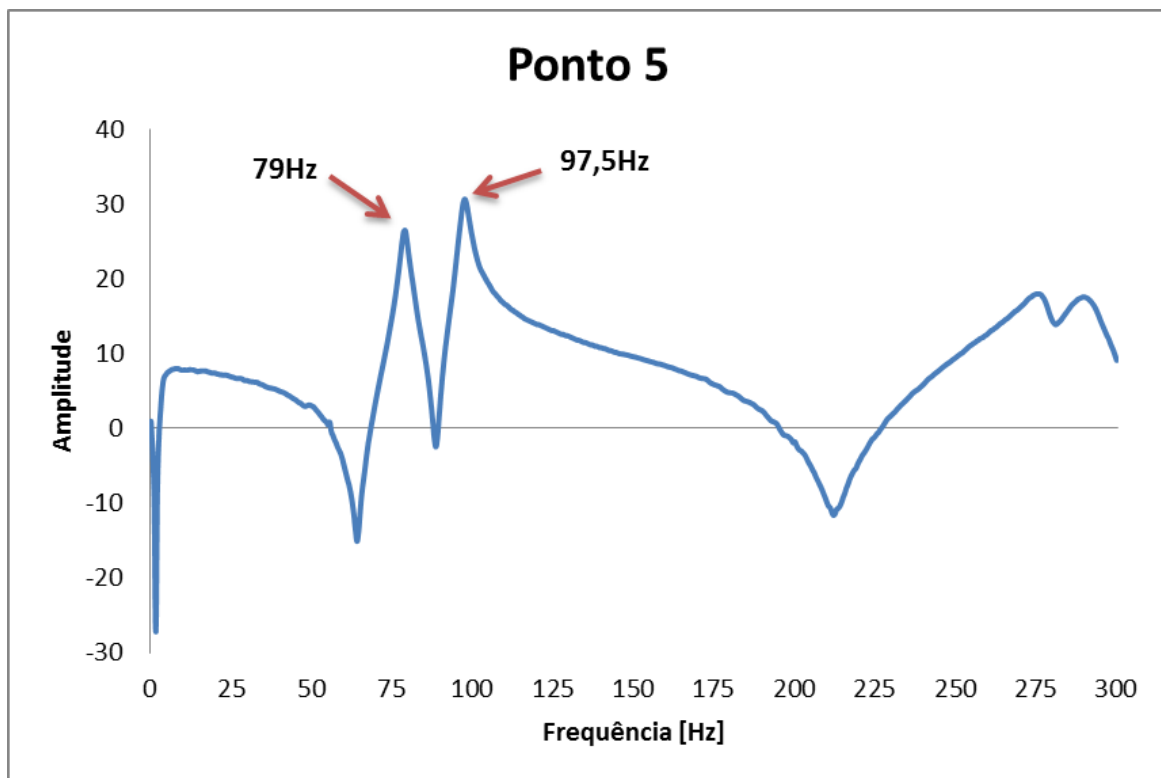


Figura 51 - Função de resposta em frequência - Ponto 5

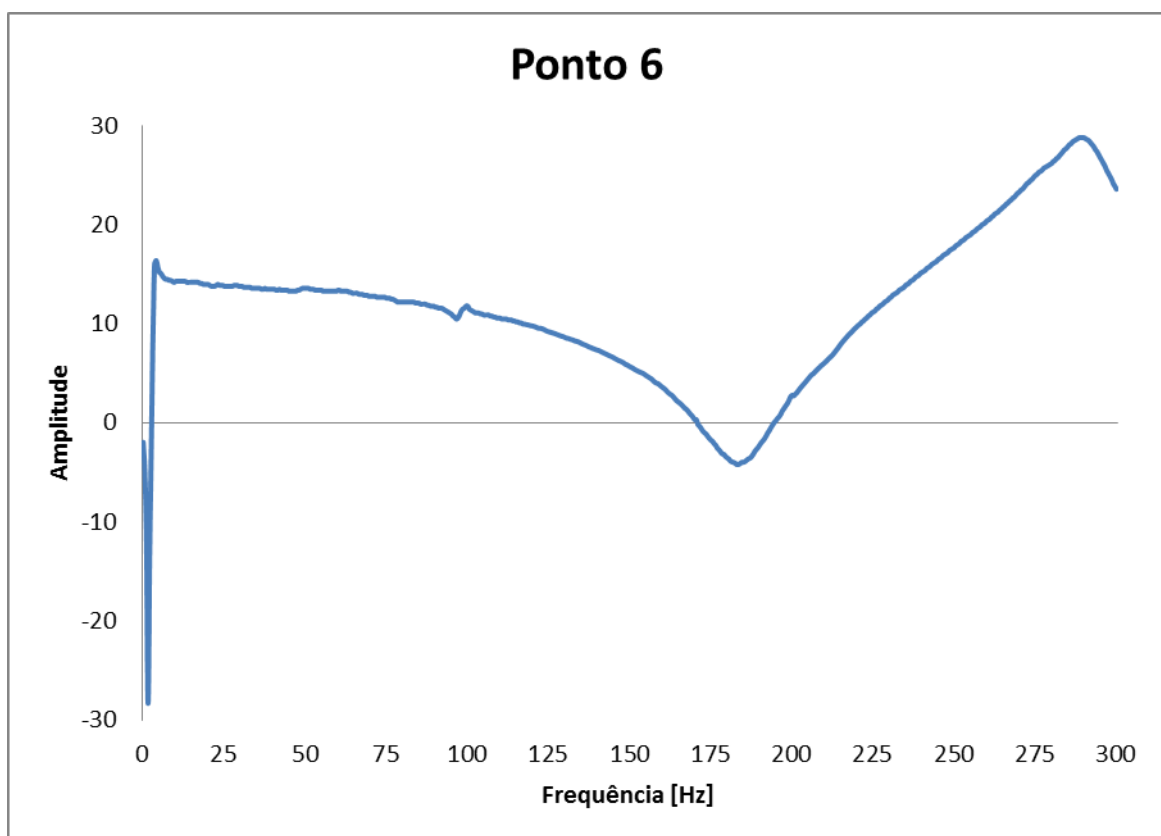


Figura 52 - Função de resposta em frequência - Ponto 6

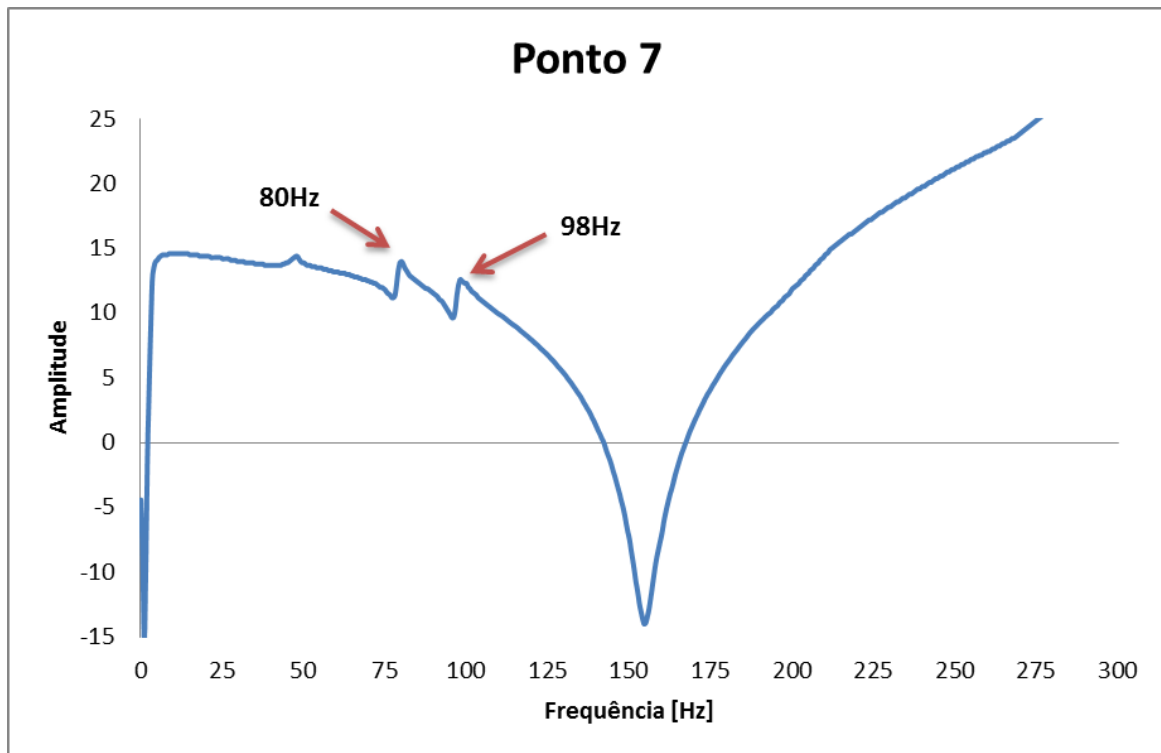


Figura 53 - Função de resposta em frequência - Ponto 7

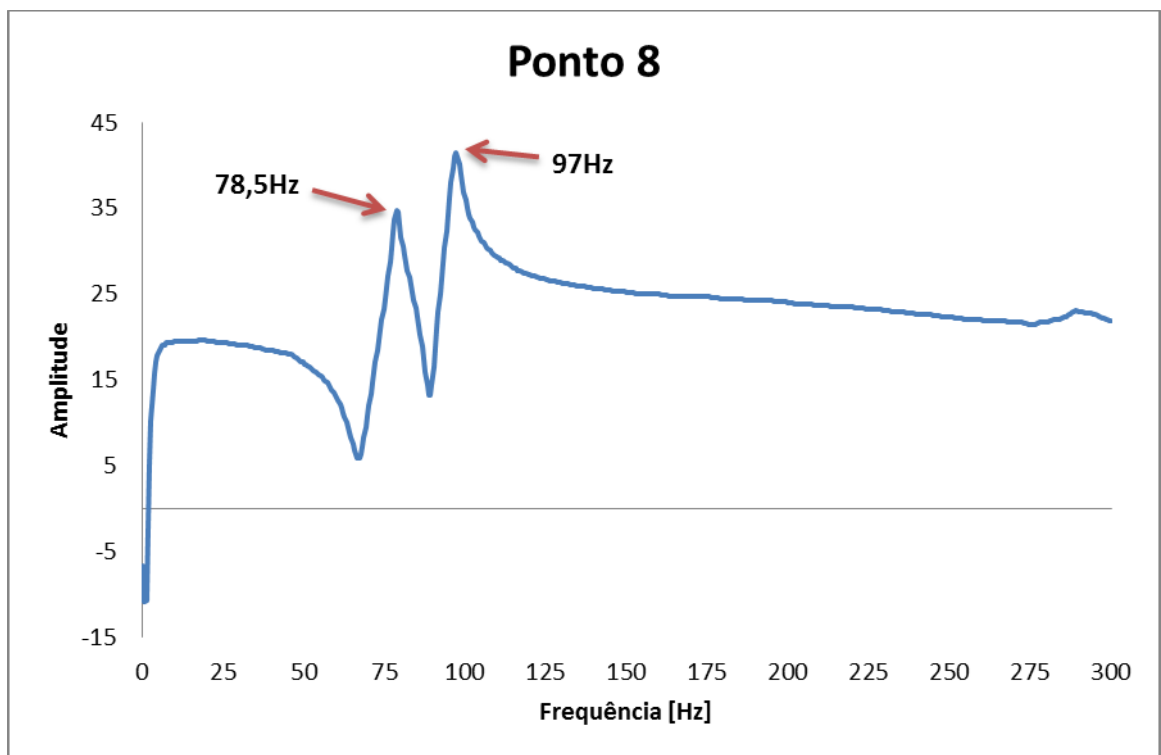


Figura 54 - Função de resposta em frequência - Ponto 8

Das funções de resposta em frequência é possível constatar que as duas primeiras frequências naturais de vibração são visíveis em quase todos os pontos. Acima desses valores

não se atingiu nenhuma conclusão quanto às frequências naturais do sistema porque o material do quadro é muito amortecido.

A tabela 3 apresenta os valores das frequências naturais de todos os pontos e a respectiva moda.

Tabela 3 - Frequências naturais nos diferentes pontos

	1ª Frequência natural	2ª Frequência natural
<i>Ponto 1</i>	78 Hz	-
<i>Ponto 2</i>	78,5 Hz	96,5 Hz
<i>Ponto 3</i>	78,5 Hz	97 Hz
<i>Ponto 4</i>	78,5 Hz	97,5 Hz
<i>Ponto 5</i>	79 Hz	97,5 Hz
<i>Ponto 6</i>	-	-
<i>Ponto 7</i>	80 Hz	98 Hz
<i>Ponto 8</i>	78,5 Hz	97 Hz
Moda	78,5 Hz	97,5 Hz

Considerou-se como primeira frequência natural de vibração, 78,5 Hz, e como segunda, 97,5 Hz.

Tabela 4 - Frequências naturais calculadas e medidas

Frequência natural	Calculado [Hz]	Medido [Hz]	Erro [%]
1	81,75	78,5	4,1
2	93,71	97,5	3,8

Comparando-se os valores obtidos no ensaio experimental e na simulação numérica (Tabela 4) conclui-se que o erro é relativamente pequeno ao contrário do que sucedeu na análise de tensões.

5.3. Análise dinâmica da deformação do quadro

A análise dinâmica de deformações consistiu em analisar as deformações no quadro nos quatro pontos anteriormente estudados durante a análise estática, procurando-se desenvolver uma metodologia que permita entender qual a influência da suspensão traseira no comportamento dinâmico do quadro.

5.3.1. Testes experimentais

Efetuaram-se dois testes, em que se compararam as deformações no quadro numa situação de pedalada e ao efetuar um salto com a suspensão traseira bloqueada e desbloqueada. Para estes ensaios recorreu-se a um sistema de telemetria.

O primeiro teste consistiu num percurso em que, se arrancava em plano, subia-se e voltava-se ao ponto inicial efectuando o mesmo percurso mas em sentido contrário. A figura 55 apresenta a correspondência de cores entre os extensómetros e o gráfico da figura 56 e 57. O gráfico da figura 56 apresenta os valores de deformação para cada extensómetro ao longo do percurso com a bicicleta com a suspensão traseira desbloqueada (quadro com um grau de liberdade).

O gráfico da figura 57 corresponde a um percurso semelhante, mas neste caso com a suspensão bloqueada (quadro rígido).

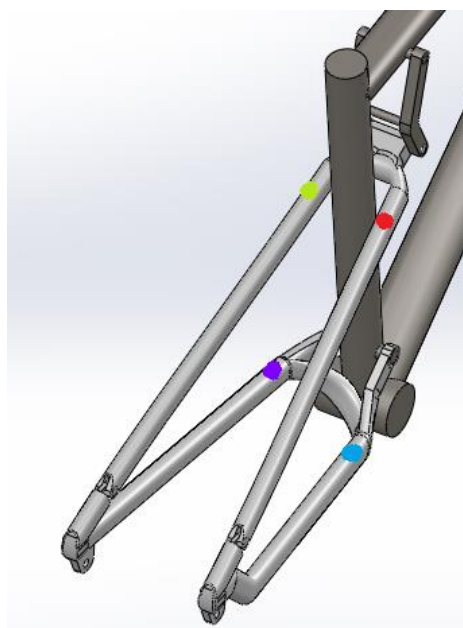


Figura 55 - Localização dos extensómetros e respectiva cor

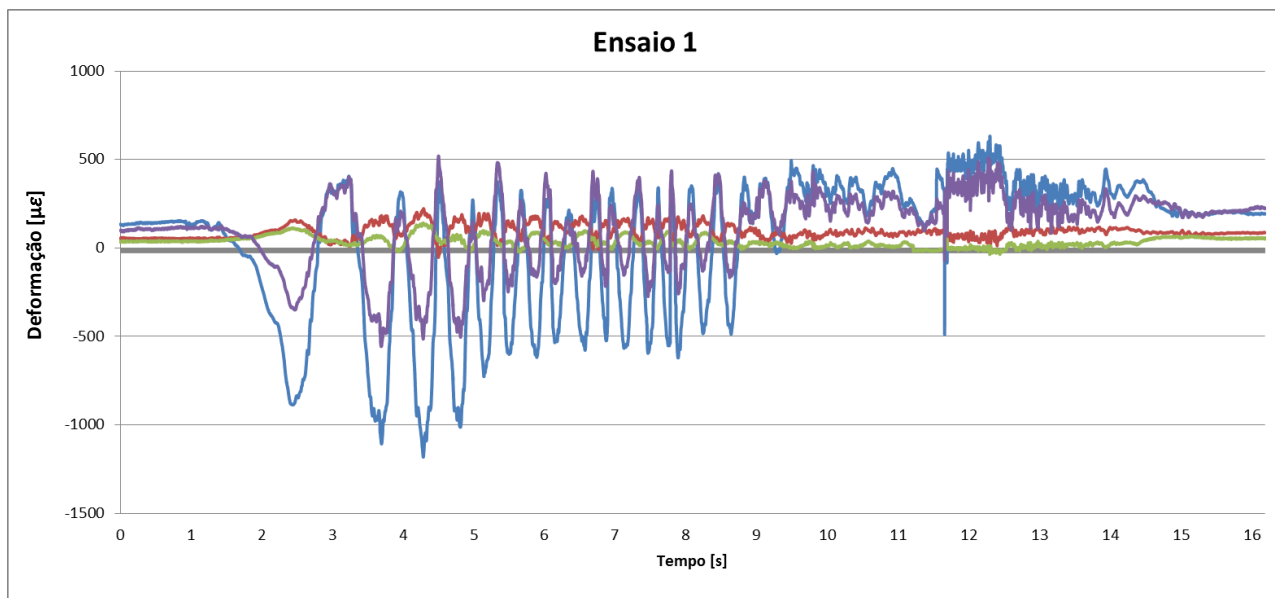


Figura 56 - Gráfico de deformações relativas ao 1º ensaio – Suspensão desbloqueada.

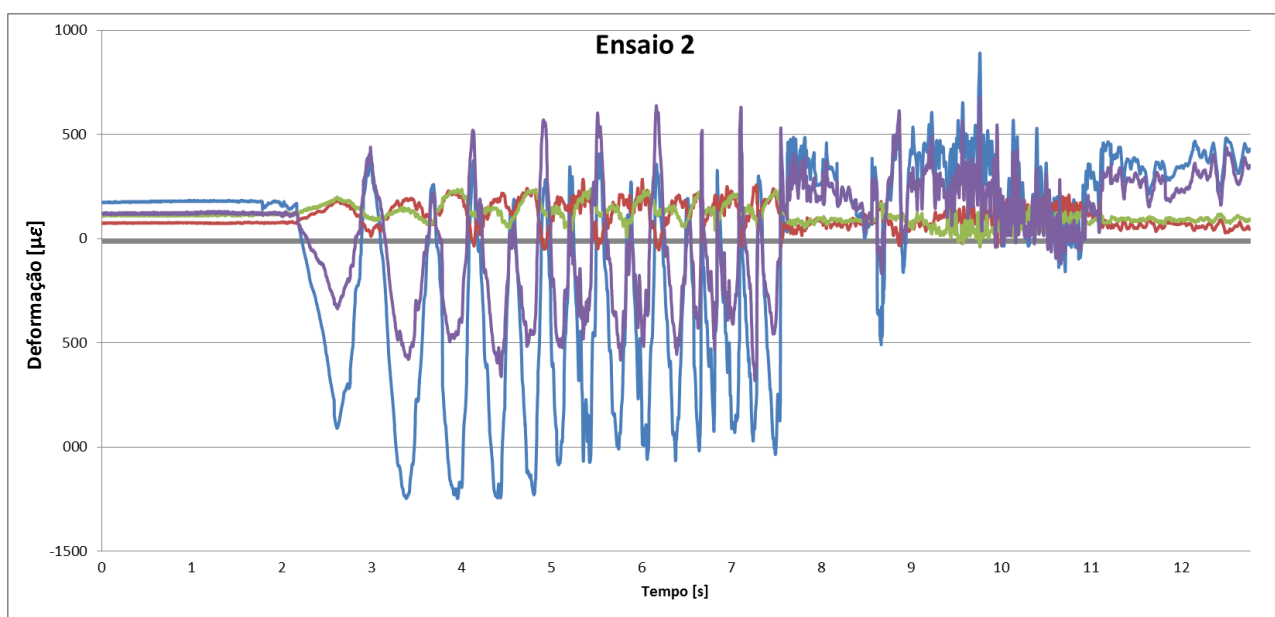


Figura 57 - Gráfico de deformações relativas ao 2º ensaio – Suspensão Bloqueada.

Analisando os dois gráficos é notório o momento em que se começou a pedalar, se parou de pedalar, virou para efectuar o percurso inverso e o momento da travagem.

Relativamente a este teste deu-se especial importância ao momento em que se aplica maior carga nos pedais, neste caso as três primeiras pedaladas, obtendo-se os valores de tensão mais elevados.

Os gráficos das figuras 58 e 59 apresentam os valores de deformação para as três primeiras pedaladas, no caso da bicicleta ter a suspensão bloqueada e desbloqueada respectivamente.

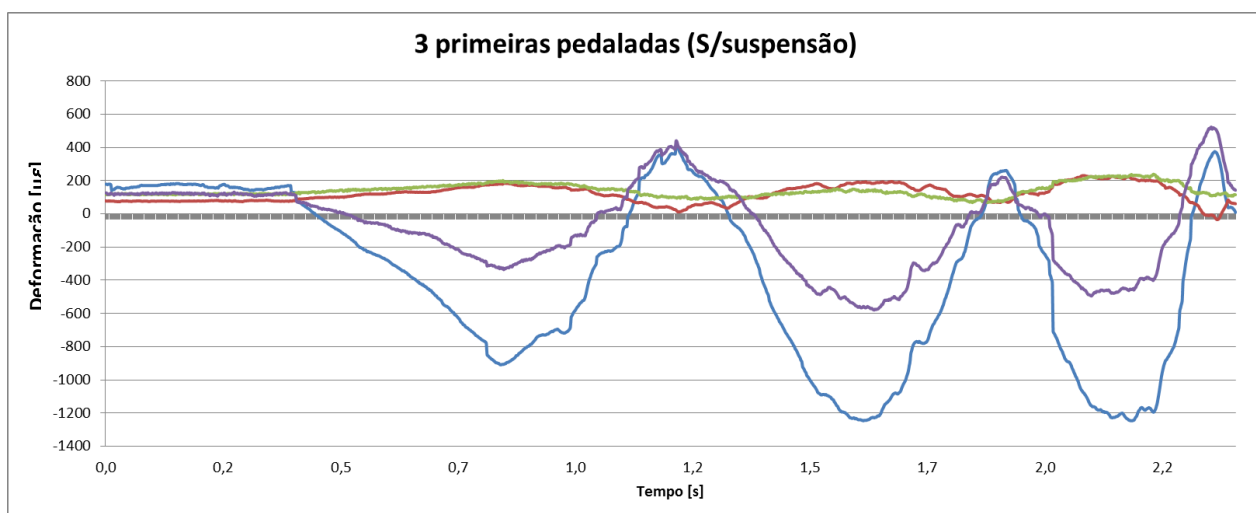


Figura 58 - Gráfico de deformação relativas às 3 primeiras pedaladas – Suspensão bloqueada

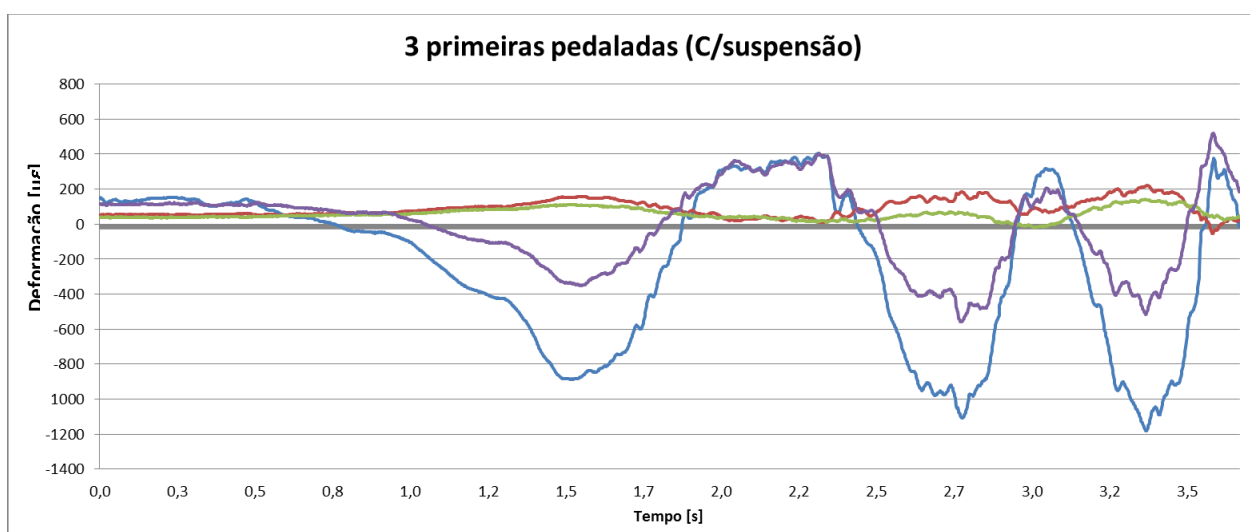


Figura 59 - Gráfico de deformação relativas às 3 primeiras pedaladas – Suspensão desbloqueada

Numa primeira análise a qualquer um dos gráficos, conclui-se que quando se pedala a escora inferior se encontra comprimida e a escora superior traccionada.

Isto deve-se á carga aplicada na pedalada que é transmitida á corrente, ao cubo da roda traseira e por fim ao quadro, como pode ser visto no exemplo da figura 60.

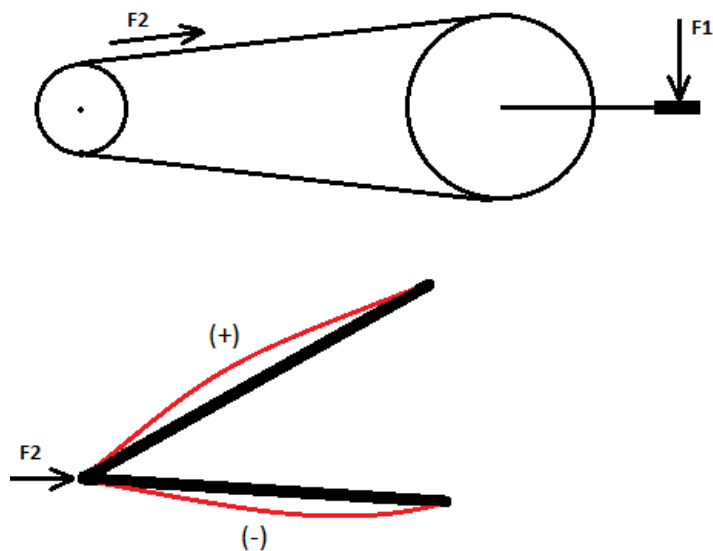


Figura 60 - Força transmitida pela pedalada á escora traseira

Outra conclusão interessante e que poderá ajudar a validar o modelo numérico anteriormente criado, é que a escora superior tem valores de deformação muito semelhantes dos dois lados e a escora inferior possui valores de deformação superiores no braço direito relativamente ao esquerdo, tal como se tinha visto na simulação numérica.

Comparando agora as duas situações, suspensão bloqueada e desbloqueada, e recorrendo aos valores de deformação máximos em cada pedalada expressos na tabela 5.

Tabela 5 - Valores máximos de deformação para as 3 primeiras pedaladas.

	Deformação [$\mu\epsilon$]					
	<i>Sem suspensão</i>			<i>Com suspensão</i>		
	1ª Pedalada	2ª Pedalada	3ª Pedalada	1ª Pedalada	2ª Pedalada	3ª Pedalada
Extensómetro 1	-908.9	-1243.2	-1246.1	-887.3	-1107.6	-1182.1
Extensómetro 2	179.4	193.4	216	152.3	182.7	222.8
Extensómetro 3	193.4	135.9	232.6	110.6	67.3	139.4
Extensómetro 4	-325.1	-565.5	-453.5	-342.3	-556.6	-514.8

Concluimos que as deformações máximas em cada braço têm valores bastante aproximados para as duas situações, não se denotando grande influência da suspensão nos valores de deformação.

Apesar disso, analisando-se as curvas de deformação dos gráficos das figuras 58 e 59 detalhadamente, percebe-se que existem algumas diferenças nas duas situações.

A primeira e considerando-se que os picos de deformação nas duas situações foram muito semelhantes, o que poderia querer dizer que aplicamos uma força na pedalada semelhante, é o tempo que dura uma pedalada. No caso da suspensão estar desbloqueada, as três pedaladas que efectuamos duraram mais tempo, cerca de 1 segundo. Isto poderá acontecer devido a parte da força aplicada na pedalada ser absorvida pela suspensão, concluindo-se que se aplicou mais força ao pedalar com a suspensão desbloqueada.

A análise da deformação durante uma pedalada de forma mais pormenorizada poderá fornecer mais informação relativamente á força aplicada numa pedalada.

Antes de efectuar essa análise, importa perceber como varia a força aplicada durante uma pedalada. A figura 61 apresenta a força aplicada por um ciclista durante uma pedalada consoante a inclinação do pedal.

Na figura vê-se que a força máxima é aplicada quando o pedal roda 105 graus relativamente ao eixo vertical, enquanto a zona em que é aplicada menor força é entre, 300 e 345 graus.

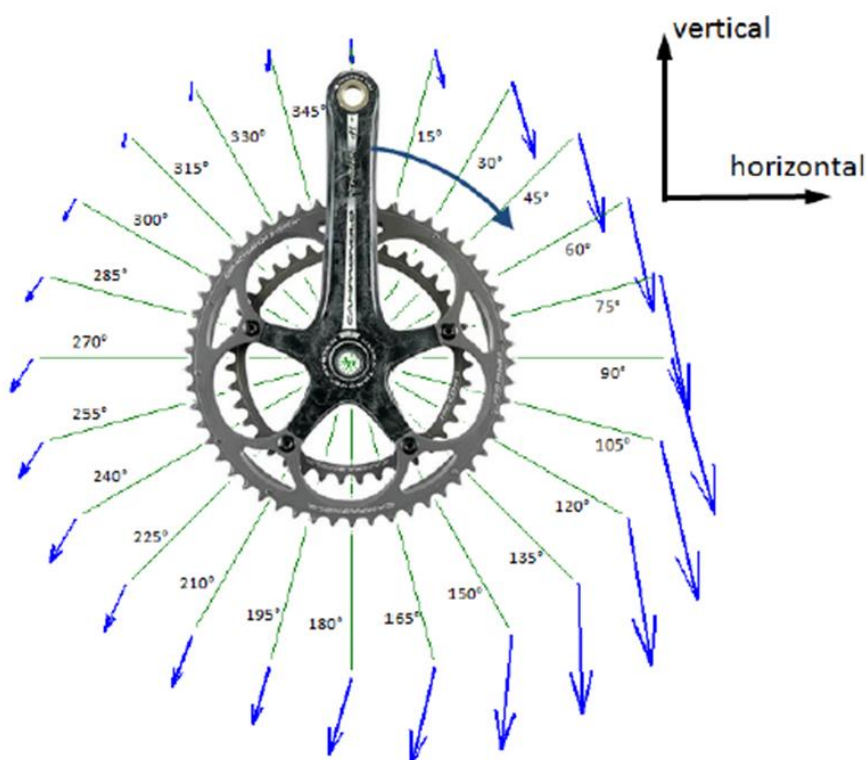


Figura 61 - Força aplicada numa rotação dos pedais [14]

As curvas de deformação podem agora ser apresentadas em função do ângulo do pedal.

A figura 62 apresenta as deformações durante a segunda pedalada com a suspensão bloqueada e a figura 63 apresenta as deformações com a suspensão desbloqueada.

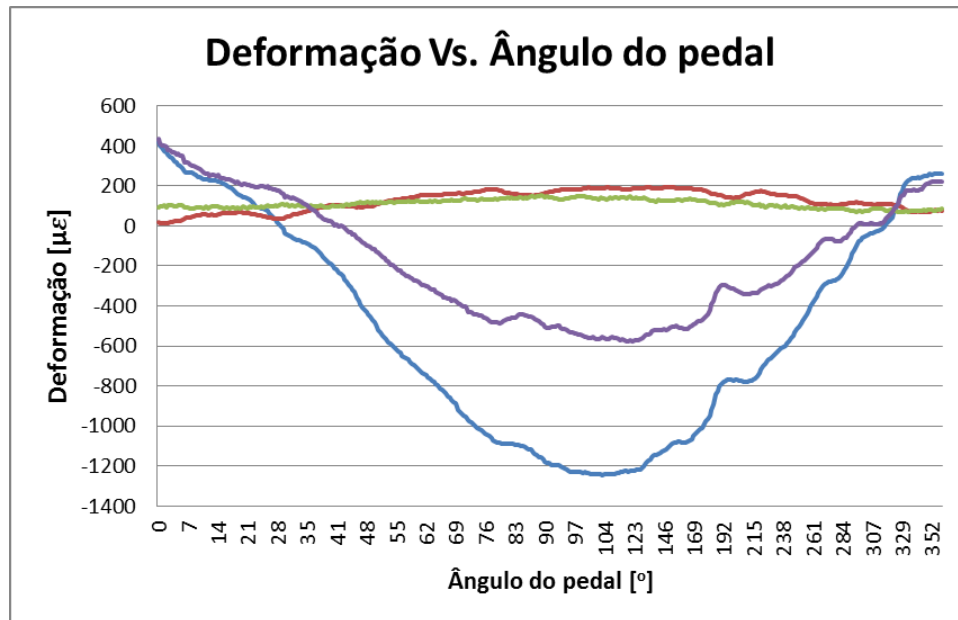


Figura 62 - Deformação durante a segunda pedalada – suspensão bloqueada

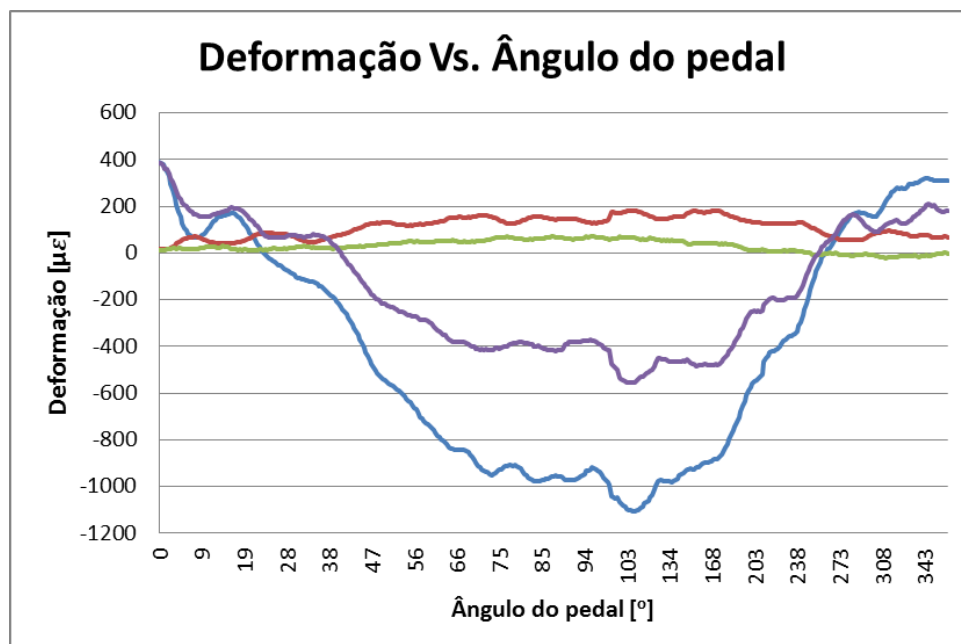


Figura 63 - Deformação durante a segunda pedalada – suspensão desbloqueada

Por último, interessa referir que é notória uma oscilação nas curvas de deformação no caso em que a suspensão estava desbloqueada, que se deve á resposta dinâmica da suspensão. A suspensão estudou-se mais aprofundadamente no segundo teste. O segundo teste consistiu em efectuar um salto com a suspensão bloqueada e desbloqueada numa pequena rampa com 30 cm de altura. Nos gráficos das figuras 64 e 65 mostram-se os resultados obtidos para cada ensaio, fazendo ainda referência ao momento do salto.

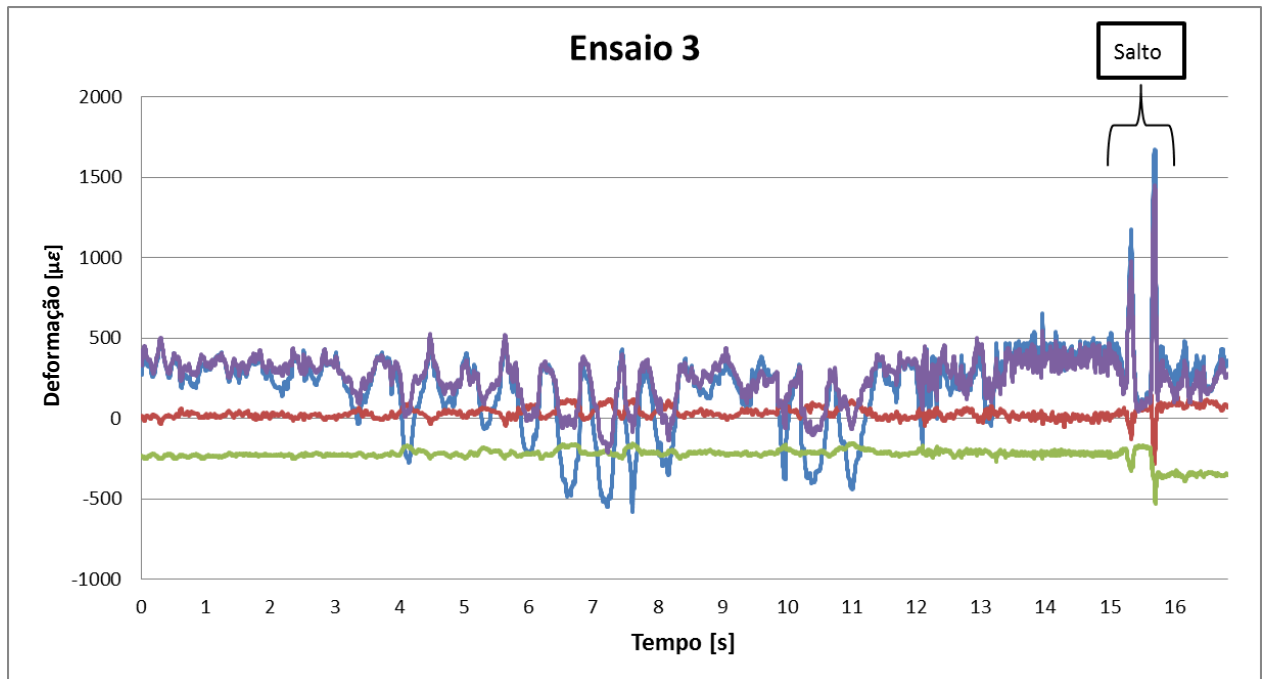


Figura 64 - Gráfico de deformações relativas ao ensaio 3 – Salto com suspensão bloqueada

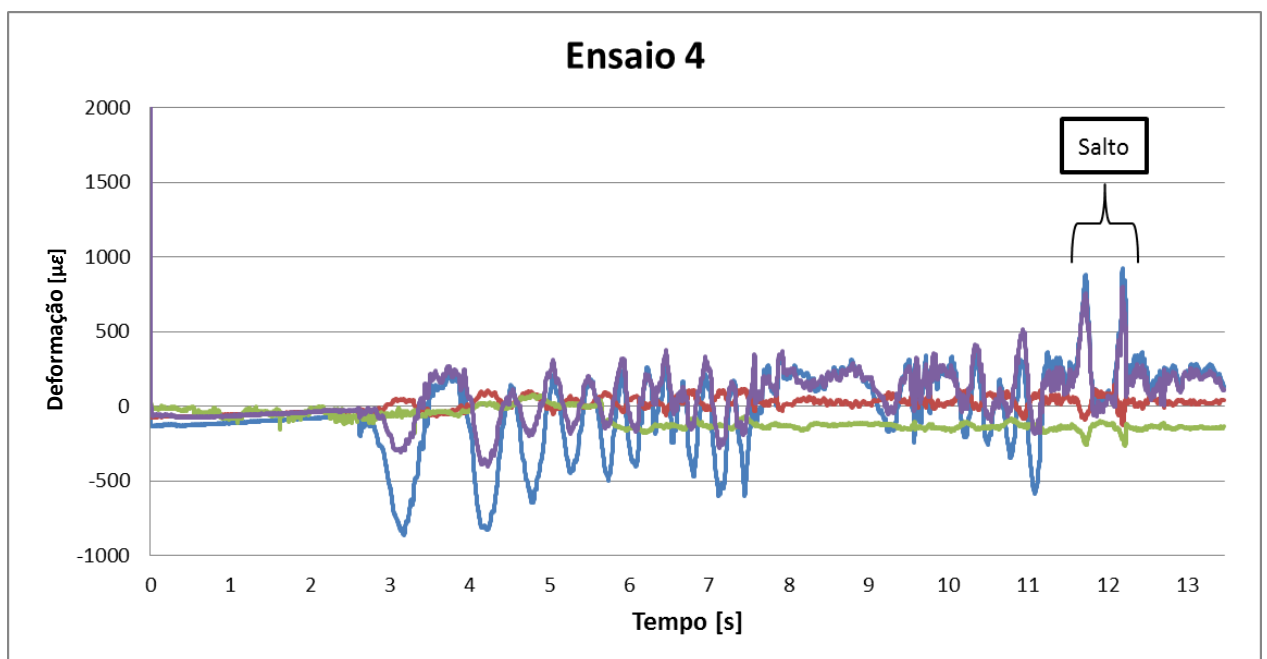


Figura 65 - Gráfico de deformações relativas ao ensaio 4 – Salto com suspensão desbloqueada

Numa primeira análise aos gráficos, conclui-se que as escoras traseiras têm um comportamento simétrico à situação de pedalada. Estando a escora inferior traccionada e a escora superior comprimida, a figura 66 ajuda a perceber o porquê de esta situação.

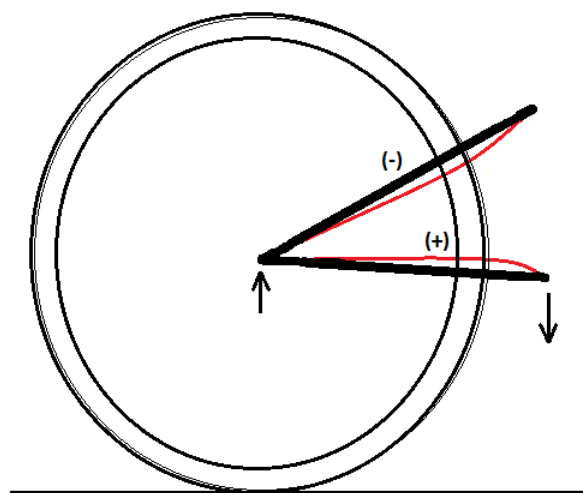


Figura 66 - Forças transmitidas durante o salto

Uma questão que se levanta da análise dos dois gráficos é:

Porquê existirem dois picos de deformação?

A resposta a esta questão é dada, analisando o momento do salto e as suas deformações de forma mais pormenorizada através dos gráficos das figuras 67 e 68. Dos gráficos é perceptível, que os dois picos acontecem num periodo inferior a 1 segundo. Correspondendo o primeiro pico, ao momento em que a bicicleta, mais precisamente a roda traseira, aterra do salto, como apresentado na figura 69, e o segundo pico, ao momento em que o peso do ciclista é transferido para a bicicleta, como apresentado na figura 70.

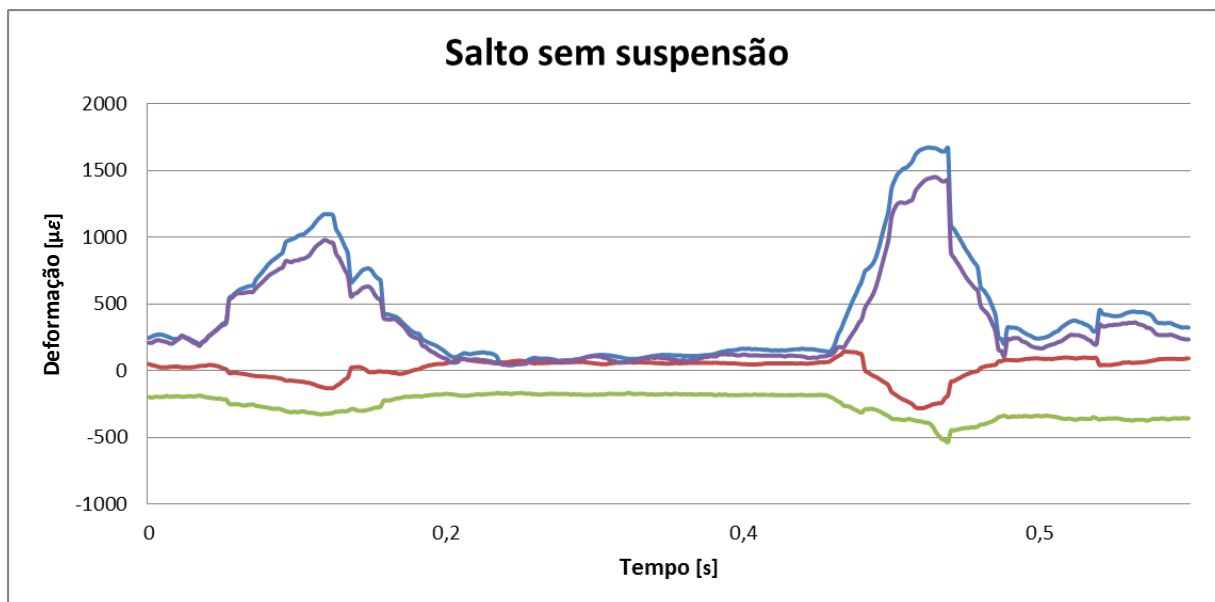


Figura 67 - Gráfico de deformações relativas ao salto – Suspensão bloqueada

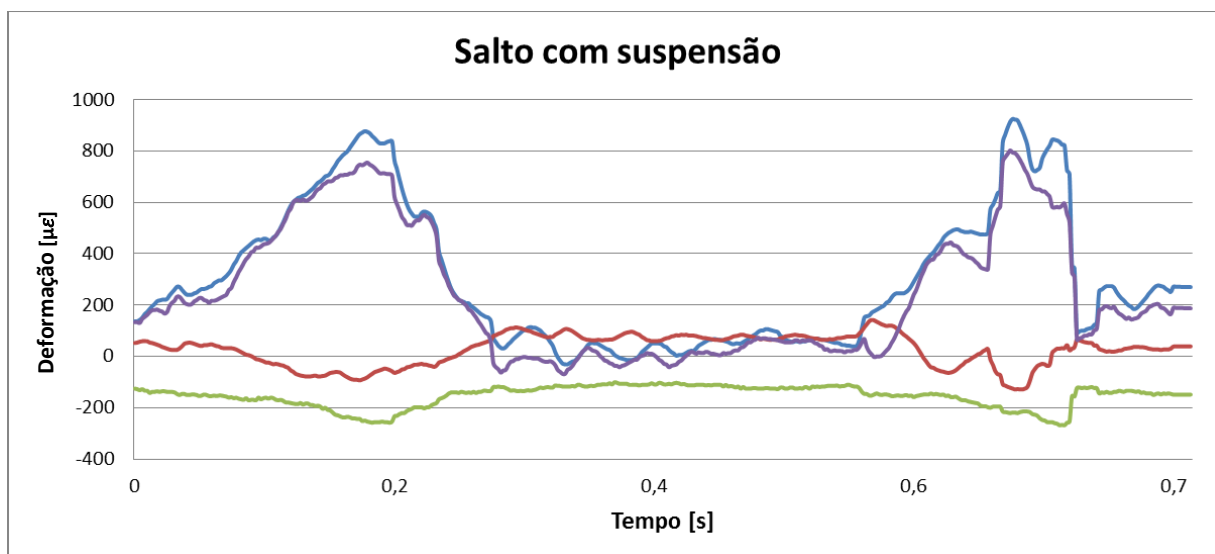


Figura 68 - Gráfico de deformações relativas ao salto – Suspensão desbloqueada



Figura 69 - Momento em que a roda traseira aterra do salto



Figura 70 - Momento em que o peso do ciclista é transferido para a bicicleta

Relativamente á influência da suspensão no comportamento do quadro, em primeiro lugar, comparam-se os valores de deformação máxima nas duas situações e em segundo lugar, comparam-se os gráficos para o momento em que é solicitada uma resposta á suspensão.

A tabela 6 apresenta os valores máximos de deformação, o quadro terá deformações mais elevadas quando se encontra rígido, pois a suspensão absorve grande parte do impacto. Comparando os valores de deformação, por exemplo, na escora inferior (extensómetros 1 e 4), depreende-se que no momento em que a roda traseira aterra do salto (primeiro pico de tensão), a suspensão absorve cerca de 30% da deformação provocada pelo impacto. No momento em que o peso do ciclista é transferido para a bicicleta (segundo pico de deformação), a suspensão absorve 80% da deformação provocada pelo impacto.

A tabela 7 apresenta em percentagem, as diferenças dos valores de deformação entre as duas situações.

Tabela 6 - Valores máximos de deformação para os saltos.

	Suspensão Bloqueada		Suspensão Desbloqueada	
	1º Pico	2º Pico	1º Pico	2º Pico
Extensómetro 1	1173.5	1671.5	877.8	925.3
Extensómetro 2	-126.7	-269.6	-86.35	-128.7
Extensómetro 3	-322.1	-396.9	-218.2	-253.7
Extensómetro 4	979.6	1450.5	755.24	802.3

Tabela 7 - Diferença de deformação entre as duas situações

	1º Pico	2º Pico
Extensómetro 1	34%	80%
Extensómetro 2	47%	109%
Extensómetro 3	47%	56%
Extensómetro 4	30%	80%

De salientar a diferença de deformações na escora superior (extensómetros 2 e 3) no segundo pico de tensão, que se poderá dever a um desequilíbrio do ciclista na aterragem do salto.

Quanto á resposta dinâmica da suspensão, primeiro começou-se por estudar as características da suspensão consultando o catálogo da marca. Da consulta, obteve-se um gráfico da relação entre a força e o curso da suspensão para o peso de 69 kgf, neste caso o peso do utilizador, apresentado na figura 71.

Do gráfico depreende-se que quanto maior for a força sobre a suspensão, menor é o curso e maior será a rigidez.

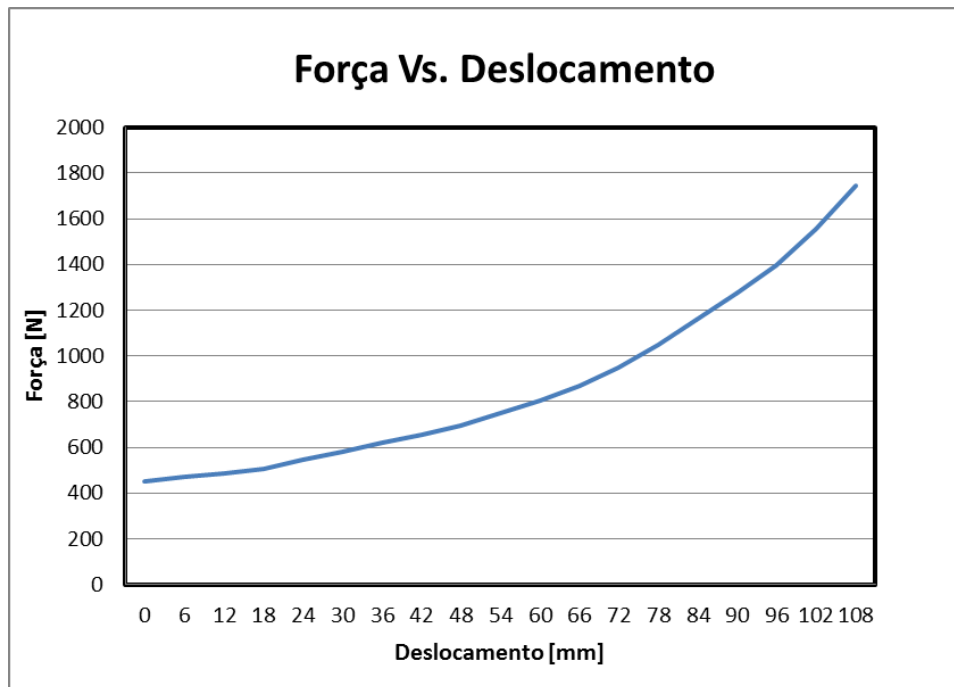


Figura 71 - Relação força vs. Deslocamento da suspensão.

A rigidez local da suspensão ao longo do curso pode ser calculada através da variação da força em função do deslocamento ($k = \frac{\Delta F}{\Delta z}$). A figura 72, apresenta a rigidez da suspensão ao longo do curso.

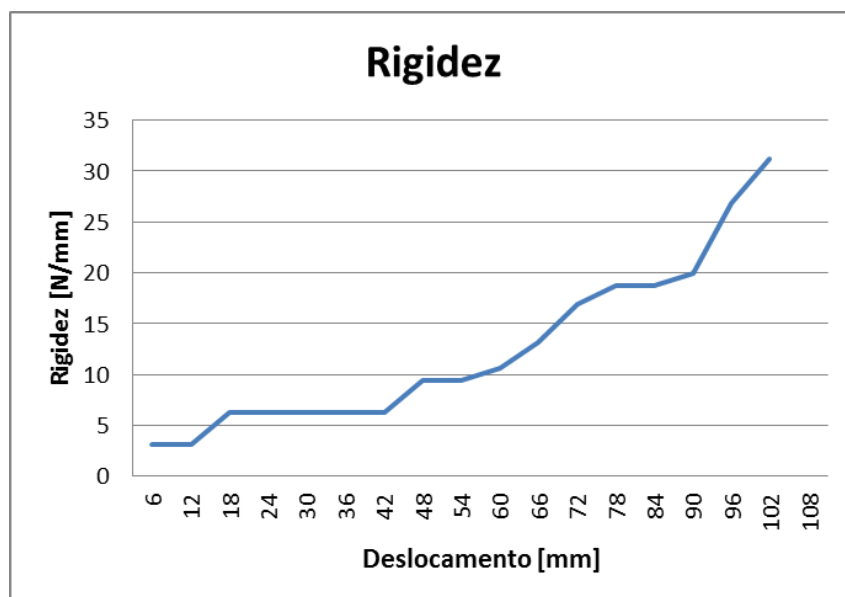


Figura 72 - Rigidez da suspensão ao longo do curso

Como a rigidez não é linear, não é possível calcular a primeira frequência natural pela $\sqrt{\frac{k}{m}}$. Para se chegar á frequência natural seria necessário recorrer á equação de movimento e criar um algoritmo que definisse a frequência a cada instante.

Uma aproximação á frequência natural poderá ser feita através da análise do gráfico da figura 73.

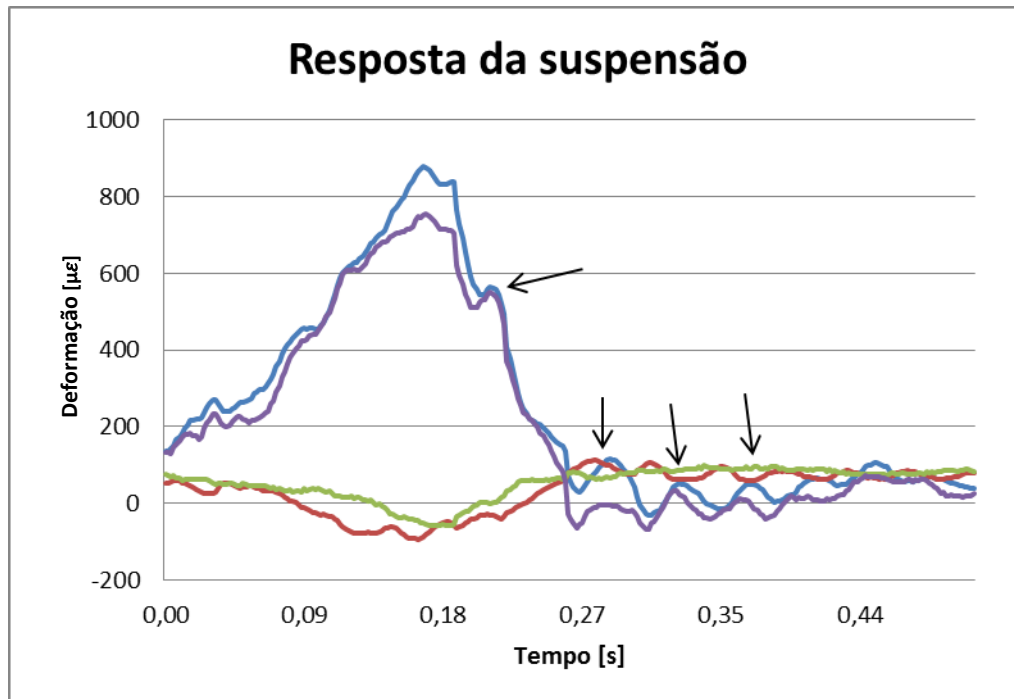


Figura 73 - Curvas de deformação para o salto com suspensão- 1ºmomento

Do gráfico percebe-se que após se atingir a deformação máxima, momento em que a roda traseira aterra do salto, a queda de deformação tem alguma oscilação, principalmente nos extensómetros 1 e 4 (linha azul e roxa respectivamente). Essa oscilação é devida á resposta da suspensão.

Como a frequência é, $f = \frac{1}{T}$, em que T é o periodo e corresponde ao tempo decorrido para uma oscilação, determinando esse tempo chegamos ao valor de frequência.

Neste caso $T = 0,081s$ e $f = 12,3 Hz$.

Para finalizar o estudo da resposta dinâmica da suspensão interessa referir que a rigidez também varia com a temperatura.

6. Conclusão

O coração de uma bicicleta é o seu quadro. Mesmo se todos os outros componentes sejam de elevadíssima qualidade, a máxima *performance* nunca será alcançada sem um quadro da mais alta qualidade.

Características como peso, resistência, rigidez e conforto são as mais importantes para os ciclistas e a maior preocupação dos engenheiros que projectam os quadros.

Os materiais e processos de fabrico de um quadro têm grande influência no seu comportamento. Actualmente o material mais apreciado pelos engenheiros é a fibra de carbono. A grande vantagem da fibra de carbono é a sua diversificação, pois permite o desenvolvimento de combinações específicas para cada parte do quadro da bicicleta. Quer isto dizer, que o projetista é que decide como quer que o quadro se comporte, enquanto noutros materiais como, aço, alumínio e titânio, está muito mais limitado.

O conhecimento do comportamento dinâmico de um quadro é essencial.

A criação de um modelo numérico no computador, do quadro de uma bicicleta, é de grande utilidade, pois permite que se efectuem diversas simulações para prever o seu comportamento. A análise ao modelo experimental também é necessária, permitindo que o modelo numérico possa ser validado. Numa primeira fase, através da análise da deformação em pontos seleccionados do quadro utilizando extensómetros e depois determinando as propriedades dinâmicas de um quadro, que são, frequências naturais, amortecimento e modos de vibração, através da análise modal experimental, o modelo numérico pode ser aferido com o modelo experimental e posteriormente validado.

Os resultados das simulações numéricas foram diferentes dos ensaios experimentais, isto porque o modelo numérico apesar de estar geometricamente igual ao modelo experimental, encontrava na espessura dos tubos a sua grande disparidade, o que deverá ter provocado tais diferenças nos resultados.

Relativamente às propriedades dinâmicas de um quadro, de referir que só foi possível determinar as duas primeiras frequências naturais porque o quadro é muito amortecido.

Muitas características podem ser alteradas no quadro de uma bicicleta para o melhorar, neste trabalho foi avaliada a influência da suspensão traseira no comportamento dinâmico do quadro, através de dois ensaios experimentais diferentes. Nos dois ensaios é clara a alteração no comportamento do quadro com a presença da suspensão.

Concluindo-se que a suspensão traseira absorve grande parte das tensões do quadro e da sua vibração.

Como trabalhos futuros, seria interessante:

- Melhorar o modelo numérico em termos de geometria e ajuste de propriedades mecânicas dos materiais para que possa ser correlacionado com o modelo experimental.
- Aprofundar o estudo sobre os quadros em fibra de carbono, nomeadamente a distribuição das fibras ao longo do quadro.
- Verificar se a bicicleta utilizada cumpre as normas estudadas relativas à vibração que impõe ao corpo do ciclista.
- Desenvolver um método para relacionar a força aplicada nos pedais com as tensões no quadro.
- Estudar a interacção entre tensão e torção no quadro da bicicleta.
- Analisar o comportamento dinâmico do quadro em situações diferentes das estudadas, nomeadamente na travagem e em piso irregular.

7. Bibliografia

- [1] Frank Whitt e David Wilson, *Bicycling Science* 3rd Edition, 2004
- [2] Amicci e Breezer - Fat Tire: A Celebration of the Mountain Bike, Mar 1, 1999
- [3] Olsen, J. (1993). Suspension comprehension. *Bicycling*, 34 (2), 60-65.
- [4] Orendurff, M.S. (1996). The Effect of Mountain Bicycle Fork Stiffness on Impact Acceleration. Unpublished master's thesis, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- [5] Seifert, J.G., Luetkemeier, M.J., Spencer, M., Miller, D., & Burke, E.R. (1997). The effects of mountain bike suspension systems on energy expenditure, physical exertion, and time trial performance during mountain bicycling. *International Journal of Sports Medicine*, 18, 197-200.
- [6] Gillespie, M.K., Groesz, M., Avedisian, L., & Rutt, R.A. (1998). Vertical displacement and velocity change while mountain biking: comparing suspension forks to a rigid front fork. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30, S81.
- [7] MacRae H-H, Hise KJ, Allen PJ. Effects of front and dual suspension mountain bike systems on uphill cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 1276-80
- [8] D. Arola, P. G. Reinhall, M. G. Jenkins, and S. C. Iverson. An experimental analysis of a hybrid bicycle frame. *Experimental Techniques*, May/June:21{24, 1999.
- [9] Craig Calfee and David Kelly. Bicycle frame materials comparison with a focus on carbon fibre construction methods. Technical White Paper, October:1{13, 2002.
- [10] Nielens, H. and T. Lejeune, Bicycle shock absorption systems and energy expended by the cyclist. *Sports Medicine*, 2004. (2): p. 71-80.
- [11] Dingwell, JB ; Joubert, JE ; Diefenthaler, F. ; Trinity, JD., Changes in muscle activity and kinematics of highly trained cyclists during fatigue. *IEEE Trans Biomed Eng* 55 (11): 2666-74.
- [12] Savionek D. , Medição e avaliação da exposição humana à vibração transmitida ao sistema mão-braço durante a actividade ciclistica. 2010. 22f. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [13] Onaya, Felipe, Modelagem dinâmica de bicicleta com suspensão integral – São Paulo, 2011

[14] Mortier, Frederick , Evaluation of the dynamic behavior of composite racing bicycles through outdoor field testing; University of Gent - May,2011

[15] Wu, Chia-Chin, Static and dynamic analysis of mountain bike and their riders; Glasgow - November,2012

[16] T. Painter, Bike Frame: Aluminum Vs. Steel, Healthy Living – 2008

[17]<http://www.brightspoke.com/qotd/2010-05-04/what-is-buttet-frame.html>, (consultada em 4-05-2013)

[18] <http://www.brightspoke.com/c/understanding/bike-frame-materials.html>, (consultada em 4-05-2013)

[19] <http://www.bicyclepaper.com/articles/126-Material-World>, (consultada em 10-05-2013)

[20] Smith, William F.; Principios de ciência e engenharia dos materiais. ISBN: 972-8298-68-4

[21] Chung, Deborah L.; Composite Materials Science and Applications, 2nd Edition

[22]<http://carbonexperts.scott-sports.com/pt/index.html#resultsTab1>, (consultada em 8-07-2013)

[23] J. D. Rodrigues, Apontamentos de vibrações de sistemas mecânicos, edição de 2011

[24] ISO 2631:2003 - Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration

[25] ISO 5349-1:2002 Mechanical vibration -- Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration.

[26] Peter Avitabile. Modal Space - In Our Own Little World. University of Massachusetts Lowell, 2007.

[27] Medindo distensão com Strain Gauges, Jan 09, 2013. National Instruments

[28] <http://www.scott-sports.com/us/en/support/manuals/> (consultada em 8-07-2013)

[29] <http://www.srm.de/srm-training-system/>, (consultada em 11-09-2013)